INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | FRACTALES 3D | IDEAS REVOLUCIONARIAS | LOCOMOCIÓN DE LAS SERPIENTES | AEROLÍNEAS ESPACIALES | N.º 413 | FEBRERO 2011

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INNOVACIÓN
Ideas que cambiarán el mundo

BIOMECÁNICA
Locomoción de serpientes y lagartos

EXPLORACIÓN ESPACIAL
Privatización de la NASA

INTERNET
La Red del futuro según Berners-Lee

Fractales en 3D

Las creaciones de Mandelbrot se alzan en la tercera dimensión

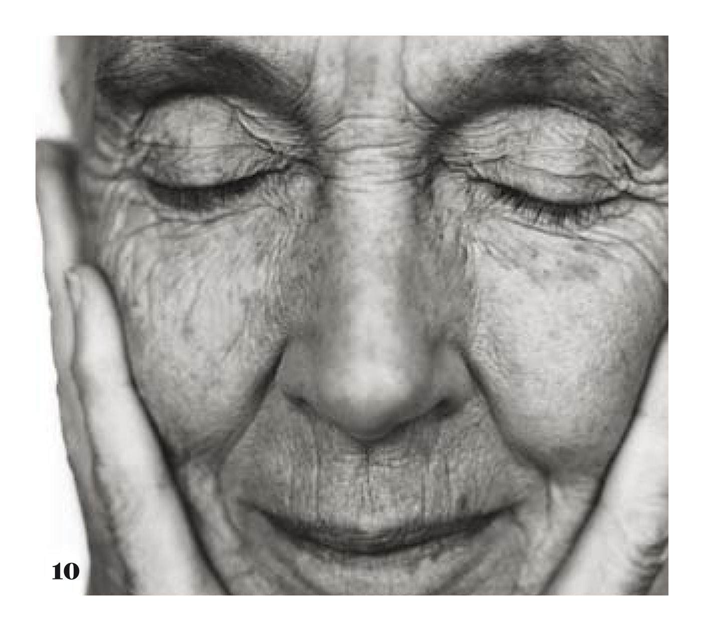


00413
9 770210 136004
6,00 EUROS



DAVID LIITTSCHWAGER

ARTÍCULOS





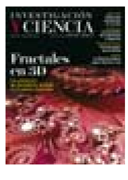


INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El «bulbo de Mandelbrot» constituye la primera generalización no trivial del conjunto de Mandelbrot a tres dimensiones. Como muestra la imagen, en las secciones del bulbo se recuperan las formas habituales del fractal bidimensional. Imagen de Krzysztof Marczak; la galería del autor puede verse en: krzysztofmarczak.deviantart.com/gallery



redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2011

CIENCIA Y SENTIDO COMÚN

Después de leer el magnífico artículo de Michael D. Lemonick «Escépticos frente a ortodoxos» [Investigación y Ciencia, enero de 2011], una vez más me parece que hay algo injusto en este tema que merece algunos comentarios.

En primer lugar, las conclusiones del IPCC representan un consenso de los expertos en este campo; además, se basan en estudios científicos publicados, la mayoría, en revistas reconocidas internacionalmente. Un consenso similar sería muy difícil en otras áreas, por lo que creo que el caso del IPCC constituye un gran mérito.

Segundo, coincido completamente en que los debates científicos hay que llevarlos a cabo en los medios adecuados; es decir, en congresos y prensa especializada. Ello permite la verificación de los resultados, rigurosidad y discusión. La Red y los medios solo se prestan a la discusión y, además, exigen rapidez. Al respecto, habría que ponderar adecuadamente las opiniones de gente no experta, por más que provengan de científicos pertenecientes a otras disciplinas.

En tercer lugar, no hace muchos años que el concepto de incertidumbre se aplica de manera sistemática en la mayoría de las áreas científicas. Es positivo que en el IPCC se haga un buen tratamiento de la incertidumbre, pero hay que puntualizar que, en algunos campos, estimar la incertidumbre puede ser difícil y tarea de expertos. Por otra parte, en ocasiones la incertidumbre puede ser poco útil, ya que es demasiado grande o incluso imposible de calcular (como ocurre a veces en cosmología, arqueología o, también, cuando se usan algunos modelos climáticos).

En cuarto lugar, es muy probable que algunos estudios en los que se basa el IPCC contengan errores. Ocurre en todo lo que hacemos los humanos. Pero el método científico permite que, tarde o temprano, haya alguien dispuesto a reproducir un cálculo o repasar una argumentación.

Por último, siempre he pensado que donde no llega la ciencia es bueno aplicar criterios de precaución y sentido común. Y creo que en el tema del cambio climático existen muchos intereses ajenos a la ciencia que lo impiden.

David Pagès Farré
Físico y técnico en medioambiente
Barcelona

EL FINAL DEL TIEMPO

En la discusión sobre la inexistencia del tiempo en ausencia de relojes naturales [«¿Puede terminar el tiempo?»; Investigación y Ciencia, noviembre de 2010], George Musser sostiene que ni siquiera la longitud de onda de Compton asociada a las partículas podía definirse durante los 10 primeros picosegundos después de la gran explosión, por lo que hasta entonces era imposible definir el tiempo. Siendo así, ¿cómo es posible afirmar que esa época duró 10 picosegundos? ¿Por qué no 10 mil millones de años?

Tom Alrich
Evanston, Illinois

Responde Musser: *Excelente pregunta. Es lo que trataba de expresar al señalar que «si en el universo primitivo no había ninguna noción de escala, ¿cómo pudo expandirse, diluirse y enfriarse?» ¿Cómo es posible afirmar que solo pudo haber estructuras al cabo de 10 picosegundos si no podemos definir el picosegundo? La respuesta de Roger Penrose es que las escalas de espacio y de tiempo, aunque ambiguas si se consideran por separado, permanecen vinculadas. Ello permite describir de manera significativa la evolución cósmica.*

UN CUERPO, MUCHOS PROBLEMAS

En «Impacto de un asteroide» [Investigación y Ciencia, agosto de 2010], Robin Lloyd analiza cómo evitar el impacto de un asteroide contra la Tierra. La autora contempla la idea de modificar la trayectoria del objeto, ya fuese mediante el envío de una nave espacial o de una carga nuclear. Ello quizás evitase el impacto contra una gran urbe o, incluso, contra nuestro planeta. No obstante, existe un problema: cuanto más lejos se halle el objeto, mayor será la incertidumbre a la hora de calcular con acierto el punto de impacto. Dada la naturaleza caótica del problema de varios cuerpos, intentar modificar la trayectoria de un asteroide muy lejano podría convertir lo que quizás iba a ser un blanco errado (la Tierra) en un blanco seguro ¿Sería posible algo semejante?

Dov Elyada
Haifa, Israel

Responde Lloyd: *Es cierto que, en un tratamiento general del problema de varios cuerpos, resulta muy complicado hacer predicciones. En este caso, sin embargo, el objeto próximo a la Tierra sería demasiado pequeño como para modificar las órbitas de los planetas, por lo que, en la práctica, se trataría de un solo cuerpo que se mueve en un entorno predecible. La dificultad real consiste en calcular la intensidad con que ha de empujarse el objeto, ya que desde lejos es difícil medir su masa.*



Agosto 2010

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

MEDICINA

Atrapar a un patógeno cambiante

Ataque de *P. falciparum* (*morado*) a glóbulos rojos (*amarillo*).

El número de fallecimientos por malaria supera al de cualquier otra enfermedad en la historia. Si nos fijamos en el parásito africano que provoca la forma más grave del trastorno, comprendemos la letalidad del patógeno. *Plasmodium falciparum* presenta un ciclo biológico con múltiples etapas y genes que mutan con frecuencia. Demuestra resistencia ante uno de los medicamentos más empleados contra la enfermedad, la cloroquina, y está empezando a cambiar para adaptarse a un nuevo fármaco, la artemisinina. El parásito también modifica la forma: varía las proteínas de su superficie a medida que se desarrolla en el huésped y se mantiene un paso por delante del sistema inmunitario.

Esa complejidad resulta perniciosa para las víctimas, pero podría ayudar a los científicos a conocer mejor el organismo. Tras secuenciar su genoma en 2002, se está empezando a descifrar ahora la información que esconde la intrincada biología del parásito sobre su historia natural. Hasta hace poco se pensaba que este había sido transmitido a los humanos por los chimpancés. Sin embargo, el pasado septiembre, un equipo de Alabama demostró que todos los organismos *P. falciparum* descienden de un único linaje que surgió de los gorilas hace millones de años. Desde entonces, el parásito ha evolucionado a gran velocidad, lo que ha conllevado la adquisición de resistencias a los medicamentos. Pero el cuerpo humano constituye un factor aún más importante. Los genes de la malaria que sufren una presión de selección natural más intensa, los que experimentan más variaciones debido a la interacción del organismo con el sistema inmunitario humano, son los que codifican las proteínas de identificación en la superficie del parásito. Se intenta averiguar por qué algunas personas enferman gravemente, mientras que otras sufren solo síntomas leves; los primeros trabajos sugieren que algunos de estos genes «*var*» provocan los casos graves en niños.

Uno de los próximos pasos esenciales en la comprensión del genoma del patógeno consistirá en evaluar las diferencias en el mismo de un parásito a otro y de una región a otra. Según Dominic Kwiatkowski, que dirige la investigación genómica de la malaria en el Instituto Sanger, conocer el grado de variación en un individuo resulta crucial. Afortunadamente, puede determinarse con una precisión extraordinaria. El grupo de Kwiatkowski y otros crearon hace poco MapSeq, una base de datos interactiva de muestras genotipadas de varios cientos de pacientes de todo el mundo. Puede usarse para identificar las mutaciones propias de una zona y adaptar así las estrategias de control frente a ellas.

—Mary Carmichael

HISTORIA DE LA TÉCNICA

Coches con alas

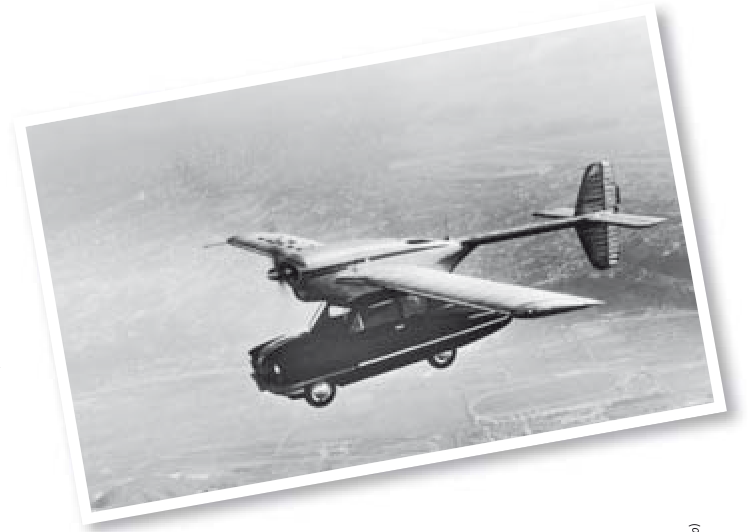
El diseño de coches voladores comenzó ya a principios del siglo xx. Los pioneros de la aviación en aquellos tiempos no pensaban solo en volar, sino también en la movilidad personal y en que los automóviles despegaran del suelo. Según John Brown, redactor del boletín de Internet *Roadable Times*, la verdadera grandeza de los hermanos Wright —que en 1903, en Kitty Hawk, Carolina del Norte, demostraron un vuelo a motor continuo y controlado— consistió en concentrarse en el propio vuelo y olvidarse de los desplazamientos por tierra.

Con el tiempo aparecieron nuevos motivos para diseñar coches voladores. En junio de 1918, Felix Longobardi, un ciudadano de Chicago obsesionado por la flexibilidad táctica, solicitó patentar un artilugio que funcionaba a la vez como coche volador, lancha cañonera (con fines antiaéreos) y submarino. Su invento no prosperó.

Todavía sin terminar la I Guerra Mundial, el legendario diseñador aeronáutico Glenn H. Curtiss solicitó la patente de un «autoplano» pensado para el ocio. Y Moulton B. Taylor, patentó en 1952 el Aerocar, famoso por utilizarlo el actor Robert Cummings. Taylor deseaba que su invento sirviera en los desplazamientos por aire y por tierra, y que su bajo coste atrajera un mercado potencialmente grande.

Hasta la fecha se han registrado docenas de patentes para vehículos voladores, de los cuales más de diez se están desarrollando, entre ellos un sucesor del Aerocar. Uno de los inventores, Terrafugia de Woburn, Massachusetts, está perfeccionando el Transition, un avión deportivo ligero no pensado para la circulación terrestre habitual. Sin embargo, tras aterrizar en un aeropuerto, los pilotos deberían poder replegar las alas electrónicamente y seguir por tierra hasta su destino final. Los primeros vuelos de prueba dieron buen resultado, pero queda por ver si la compañía logrará salir adelante como se espera.

—Ricky Rusting



El Convaircar, modelo 118, diseñado por Theodore P. Hall, funcionó bien en un vuelo de prueba en 1947, pero un accidente posterior acabó con la esperanza de comercializarlo.

CECIL H. FOX, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*arriba*); GETTY IMAGES (*abajo*)



ANIMACIÓN POR ORDENADOR

Rapunzel y las leyes de la física

La primera vez que los animadores gráficos de Disney vistieron a Rapunzel, la protagonista de largos cabellos de *Enredados* (adaptación del cuento de los hermanos Grimm, de próximo estreno en España), se toparon con un problema. Cuando hicieron que se girase con rapidez frente a un espejo, ella se quedó paralizada y los múltiples pliegues de su vestido permanecieron rígidos. Los informáticos se enfrentaban a una dificultad que, durante años, ha supuesto la pesadilla del sector.

«Desde un principio nos propusimos lograr vestimentas más elaboradas que las utilizadas hasta el momento [en animaciones computerizadas]», recuerda Rasmus Tamstorf, uno de los principales técnicos de animación de Disney. «Cuando un personaje ataviado con ropas sueltas o de múltiples visos se mueve, los balanceos de la tela crean una gran cantidad de problemas.»

Para resolverlos, Tamstorf y su equipo entablaron contacto con Eitan Grinspun, informático de la Facultad de ingeniería de la Universidad de Columbia y experto en la respuesta de los materiales ante las colisiones. En 2002, Grinspun había filmado la caída de un sombrero y su rebote contra el suelo. Después de estudiar durante horas las imágenes a cámara lenta, halló la ecuación más sencilla que describía los movimientos del sombrero. Las variables relevantes incluían la fricción, la elasticidad y la cantidad de movimiento del objeto al golpear contra el suelo. Después, tradujo esa ecuación a un código informático simple que predecía el movimiento de cualquier material flexible o elástico, ya se tratase de goma, tejidos o planchas de metal.

Pero el elaborado vestido de Rapunzel constituía un desafío aún mayor. Simular el movimiento de ropas con varias capas requiere tener en cuenta miles de colisiones potenciales al mismo tiempo. Cuando la cantidad de datos resulta excesiva para un ordenador, este recurre a un programa auxiliar de prevención contra fallos (*fail-safe*); en estos casos, uno que evite posteriores colisiones entre las capas del tejido. En el pasado, los programas permitían el movimiento de la ropa, pero no el desplazamiento relativo entre las capas de tela. Ello otorgaba a la vestimenta una apariencia rígida. Tras meses de trabajo, Grinspun y el equipo de Tamstorf dieron con una solución: si bien su código también detenía las colisiones, las capas del vestido aún podían deslizarse unas sobre otras. Además, el programa daba cuenta de la fricción, con lo que el resultado adoptaba una apariencia mucho más realista.

Grinspun se enfrenta ahora a un nuevo problema: un código que prediga el movimiento del cabello, cuyas colisiones son aún más complejas que las de la ropa. Espera que sus soluciones aparezcan el año próximo en otra animación.

—Adam Piore

CORTESÍA DE DISNEY (*Rapunzel*); MUSEO DE LA EVOLUCIÓN HUMANA (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

25 de febrero
Hilos de torbellino y números complejos
Luis Vega González,
Universidad del País Vasco
Departamento de matemáticas y computación
Universidad de la Rioja
Logroño
www.unirioja.es/cu/jvarona/seminario.html

Del 7 al 9 de marzo – Congreso
Fronteras de la biología
Centro de Regulación Genómica
Barcelona
www.crg.eu/frontiers_biology

EXPOSICIONES

Comprender para sobrevivir: el clima
Cosmocaixa
Madrid
www.obrasocial.lacaixa.es

Gravedad cero
Agencia Espacial Europea
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/museo/exposiciones

La dieta que nos hizo humanos
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com



OTROS

19 de febrero – Exploración
Ecosafari en el parque del Castell de l'Oreneta
Barcelona
Iniciativa del Instituto Jane Goodall
www.biodiverciudad.org/safari.asp

Del 6 al 10 de marzo – Taller
Química sostenible
Parador de Ávila
Ávila
www.britishcouncil.org/es/spain-science

ALTAS ENERGÍAS

Física imprevista en el LHC

Después de la parada técnica de Navidad, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN tiene previsto reanudar las colisiones protón-protón durante el presente mes de febrero. Si bien el acelerador aún ha de encontrar el bosón de Higgs, partículas supersimétricas o candidatos a materia oscura, en sus primeros meses de funcionamiento ya tuvo tiempo de registrar un fenómeno que, desde entonces, intriga a numerosos expertos.

A finales de septiembre del año pasado, el CERN anunció que, en algunas colisiones de protones, las partículas producidas salían despedidas en haces sincronizados, como si se tratase de bandadas de pájaros que han acordado previamente sus direcciones de vuelo. En palabras de Guido Tonelli, portavoz de la colaboración CMS (el detector que registró el fenómeno): «Hemos pasado todo este tiempo tratando de convencernos de que lo que hemos visto es real».

Se trata de un efecto delicado. En las colisiones entre protones a 7 TeV en las que se producían unas 110 partículas o más (colisiones de alta multiplicidad), estas salían despedidas en pares cuyas direcciones exhibían correlaciones angulares inesperadas. En opinión de Frank Wilczek, del Instituto de Tecnología de Massachusetts y ganador del Nobel en 2004 por el descubrimiento de la libertad asintótica en las interacciones fuertes, el fenómeno quizás apunte a «nuevos detalles en la estructura interna del protón». Según explica: «Efectuar experimentos a energías tan elevadas implica estudiar el protón con una resolución espacial y temporal sin precedentes».

En realidad, un protón consiste en un complejo medio formado por quarks y gluones. Estos últimos median las interacciones entre quarks y son los responsables de mantenerlos «pegados» para formar otras partículas, como protones o neutrones. «No parece imposible que las interacciones entre los gluones de dicho medio ya exhiban ciertas correlaciones; en tal caso, estas se reflejarían en las propiedades de las nuevas partículas [producidas tras la colisión]», sostiene Wilczek. En caso de confirmarse, el fenómeno constituiría un hallazgo de calado sobre una de las partículas más comunes del universo y cuyas propiedades creían entenderse bien.

—Amir D. Aczel

¿QUÉ ES ESTO?

Este insecto rosa y verde, un saltamontes de gran tamaño perteneciente a la familia *Tettigoniidae*, es una de las 200 nuevas especies descubiertas en fecha reciente en Papua Nueva Guinea. El animal, de unos ocho centímetros de longitud, habita el follaje de las accidentadas montañas Muller. Según el investigador de la Universidad de Harvard Piotr Naskrecki, quien descubrió el insecto durante una expedición, la evolución probablemente haya dotado al animal de sus ojos rosas como medio de camuflaje.

A menudo, las hojas de las selvas tropicales se encuentran salpicadas por hongos y epifitas plantas no parasitarias que crecen sobre otros vegetales. Aunque esos ojos puedan parecer llamativos, cuando el insecto permanece inmóvil crean la ilusión de que no es más que una hoja.

—Anna Kuchment



ECOLOGÍA

Reforestación

Nuevos modelos basados en la dinámica de la vegetación

La restauración ecológica se define como el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (se considera que un ecosistema se ha recuperado cuando éste puede mantener su composición de especies, estructura espacial y procesos dinámicos). Por tanto, la restauración de la vegetación no consiste en una mera consecución de un dosel forestal integrado por una o pocas especies (nativas o no), como se observa en nuestros espacios protegidos, sino en engranar el elenco de especies nativas de una forma que recree el modo en que estas se ensamblan, en el espacio y el tiempo, en las comunidades naturales.

Ambicionado durante mucho tiempo por biólogos, naturalistas y ecologistas, hoy es este un objetivo realista. La sociedad y las administraciones ven la reforestación ya no solo con fines productivos; los valores naturales, ambientales y ecológicos cobran el mayor protagonismo en el nuevo milenio. Nos hallamos, por tanto, ante un escenario en el que urge la colaboración entre la ecología vegetal y las ciencias forestales.

Tres ideas resultan fundamentales en las visiones modernas de restauración ecológica de la vegetación: sucesión de la vegetación, balance de interacciones entre plantas en la sucesión y heterogeneidad y dinámica del paisaje.

Sucesión ecológica

La sucesión ecológica describe el patrón espacial y temporal de reemplazamiento de especies que ocurre de forma natural tras una perturbación. Su estudio permite diagnosticar el estado de recuperación de la vegetación y evaluar la capacidad de desarrollo de la vegetación actual, es decir, saber si esta se transformará en una formación madura (sucesión secundaria) o si, por el contrario, se detendrá en sus fases iniciales, de modo que se autoperpetuará la vegetación pionera.

Numerosos estudios han demostrado que en ambientes degradados las plantas jóvenes de la mayoría de especies mediterráneas de árboles y arbustos altos crecen solo bajo el cobijo de otras especies (facilitación), donde hallan un alivio frente al estrés hídrico y lumínico del verano, una mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo y una protección frente a grandes herbívoros.

En nuestros estudios de reforestación en la sierra jaenera de Cazorla empleamos modelos markovianos. Estos modelos matemáticos permiten estudiar el cambio temporal de sistemas que dependen de fenómenos aleatorios. Nuestro sistema corresponde a un conjunto de especies vegetales cuya abundancia local cambia con el tiempo debido al reemplazamiento de individuos de unas especies (nodrizas) por otras (facilitadas). Dado que la probabilidad del reemplazamiento es distinto para cada par nodriza-facilitada, el cambio temporal global del sistema entraña cierta aleatoriedad.

Mediante esos modelos hemos demostrado que, en condiciones seco-subhúmedas de montaña mediterránea, la frecuencia de plantas jóvenes facilitadas muestra una correlación positiva con la probabilidad de que se desencadene una sucesión secundaria que lleve espontáneamente a la formación de comunidades maduras. Por el contrario, la ausencia de juveniles facilitados significa un colapso en la sucesión secundaria y la autoperpetuación de una vegetación pionera heliófila (que necesita una gran exposición de luz solar) de pequeño porte.

El pastoreo sostenido y la escasa dispersión de semillas de especies arbóreas guardan en estas zonas relación con el colapso de la sucesión secundaria. Este ejemplo ilustra el modo en que estas herramientas de modelización sirven para evaluar el grado de intervención necesario en zonas que quieren restaurarse, por ejemplo, mediante la identificación de las zonas que pueden progresar por sí mismas hacia una vegetación madura y las

El parque natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas padece periódicamente el azote del fuego. Este régimen de incendios genera un mosaico de vegetación en distintos estados de recuperación. La imagen muestra un paisaje típico de este mosaico: zonas altamente degradadas (cimas de los cerros), zonas poco alteradas o muy recuperadas (barrancos y laderas sombreadas) y zonas en que la vegetación va ganando en espesura y porte (partes bajas de las laderas). Cada pieza del mosaico requiere una estrategia de reforestación distinta.

WIKIMEDIA COMMONS

que requieren la intervención de restauración para salir del colapso.

Balance de interacciones

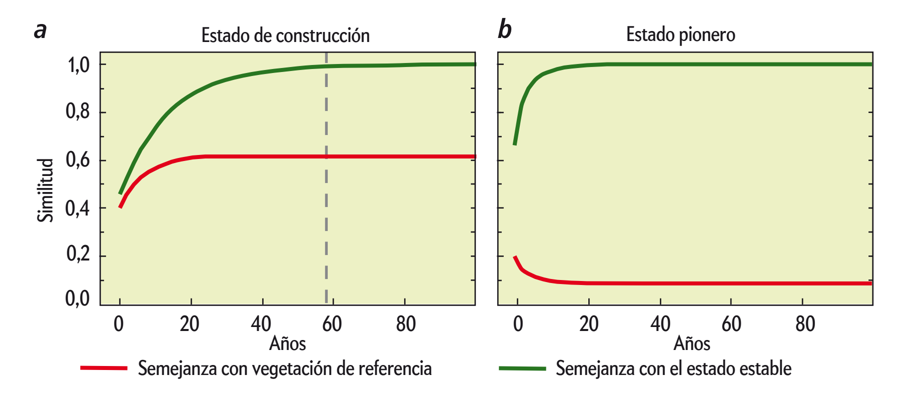
El estudio de las interacciones entre plantas en diferentes estados sucesionales puede ayudar al desarrollo de técnicas de reforestación, que mejoren el éxito de plantado de especies nativas. Así, plantas pioneras establecidas de forma espontánea podrían inhibir o facilitar el establecimiento de los juveniles plantados.

Numerosos datos de la región mediterránea sugieren que la plantación bajo arbustos mejora el éxito de establecimiento de juveniles de especies leñosas en montes degradados. De ahí que el grupo de ecología terrestre de la Universidad de Granada haya desarrollado técnicas de reforestación para la montaña mediterránea mediante el uso de arbustos pioneros a modo de nodrizas.

Según nuestros estudios de restauración postincendio en la sierra de Cazorla, la restauración asistida por nodriza no solo mejora el éxito de plantado (entre 2 y 9 veces mayor que la reforestación tradicional para especies arbóreas nativas en condiciones de pluviometría muy variada) sino que además ayuda a recuperar propiedades de la comunidad. La composición y diversidad específica y funcional del banco de juveniles obtenido por esta técnica guardan mayor semejanza con las del banco de juveniles de comunidades nativas que las que se obtienen mediante reforestación tradicional. Además, el servicio de facilitación de las nodrizas es específico de la combinación de especies y formas de crecimiento implicadas en el plantado.

Tal interdependencia conforma una regla de ensamblaje entre formas de crecimiento que recrea una sustitución serial de arbustos pioneros por matorral arborescente, y de este por árboles. En la montaña mediterránea, la sucesión secundaria que conduce a los bosques nativos es, por tanto, mediada por facilitación y puede ser promovida y acelerada mediante un uso apropiado de la restauración asistida por nodriza.

Asimismo, hemos demostrado que, en comparación con la restauración asistida por nodrizas, las técnicas de reforestación tradicional deben incorporar riego en verano, protección frente a ramoneo, inoculación de micorrizas o tierra vegetal propia de las especies plantadas para obtener un éxito de plantado equiparable al empleo de arbustos nodrizas. Con todo, las técnicas tradicionales difícilmente logran recuperar las propiedades funcionales de una comunidad natural.

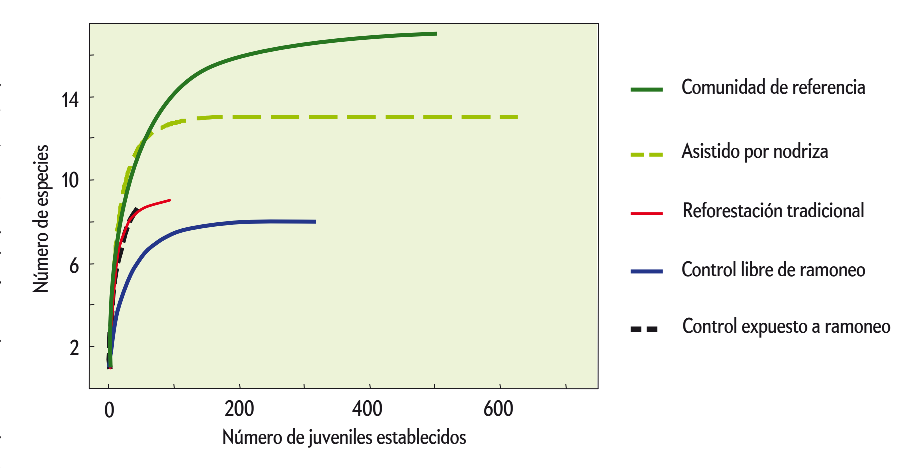


Dinámica temporal de la vegetación tras un incendio según un modelo markoviano de reemplazamiento de especies. En zonas en un estado sucesional intermedio (estado de construcción), con baja frecuencia de pastoreo y elevada frecuencia de juveniles facilitados, la dinámica conduce a una vegetación semejante, en gran medida, a la comunidad madura del territorio (*a*). En zonas de vegetación heliófila de pequeño porte (estado pionero), con alta frecuencia de pastoreo y baja frecuencia de facilitación, se colapsa la sucesión y se perpetúa el estado pionero; no hay acercamiento a la comunidad madura (*b*).

Heterogeneidad y dinámica del paisaje

La heterogeneidad es un atributo natural de las comunidades. Su importancia en la dinámica y resiliencia de la comunidad viene siendo resaltada por los ecólogos desde hace largo tiempo. Sin embargo, su función ha sido ignorada en las actuaciones de repoblación forestal, que, en su mayoría, han planteado el establecimiento de rodales forestales homogéneos.

La degradación de un territorio por sus usos seculares o por fuertes perturbaciones como el fuego genera en el paisaje un mosaico heterogéneo de situaciones de degradación y conservación. Dicha heterogeneidad mantiene desacopladas temporalmente las dinámicas de recuperación de la vegetación de distintos rodales. Numerosos sistemas forestales naturales se caracterizan por dinámicas de este tipo, denominadas de mosaico en estado estacionario, que son mucho más resilientes y controlan el alcance de las perturbaciones futuras. Asimismo, la heterogeneidad espacial entre grandes rodales ha sido incorporada en las últimas décadas al estudio de las dinámicas de



Riqueza de especies en el banco de juveniles obtenido con distintas prácticas de reforestación y manejo. De los procedimientos considerados, sólo la técnica de reforestación asistida por nodriza acerca el banco de juveniles formado a la comunidad de referencia.

paisaje; comienza a ser utilizada, más conceptualmente que empíricamente, en planteamientos de restauración de ecosistemas.

La investigación que hemos desarrollado en la sierra de Cazorla nos ha llevado a plantear una restauración de la vegetación estructurada por rodales. Proponemos el establecimiento de distintas combinaciones de especies en cada rodal, acordes con las condiciones del medio físico, manteniendo diferentes rodales en estadios sucesionales distintos. En cuanto a la estructura espacial, los rodales deben fomentar el flujo de semillas por el paisaje, por lo que deben mantener distancias entre ellos que no representen barreras insalvables para las aves y mamíferos (carnívoros y roedores) que actúan como dispersantes de semillas. Elementos comunes de las zonas de montaña como los barrancos, que merced a su mayor humedad edáfica se cubren fácilmente de vegetación, pueden ser utilizados como microcorredores ecológicos para contribuir a esta función.

Estudios piloto

Las ideas anteriores se están incorporando ya en los últimos planes de restauración de la vegetación que se desarrollan en algunos espacios protegidos afectados por incendios forestales en la última década. Su aplicación a otros territorios requiere una planificación individualizada, adaptada a las peculiaridades de la vegetación natural y las particularidades físicas (clima, suelos, topografía) del territorio.

Pese a las particularidades, dichas planificaciones deben compartir un elemento común: un estudio piloto. Este deberá incluir un diagnóstico del estado de recuperación de la vegetación en las zonas degradadas y de las dinámicas sucesionales propias de la región, ensayos experimentales de técnicas de reforestación y zonificación y diseño paisajístico de la restauración.

Una planificación detallada reviste especial importancia en este tipo de trabajos, ya que el éxito final de la reforestación se advierte solo al cabo de varias décadas. Nuestro grupo de investigación, así como varios equipos de ecólogos vegetales por toda España, ha desarrollado metodologías de trabajo que permiten abordar en un breve plazo de tiempo esos tres aspectos necesarios para la planificación de trabajos de restauración de la vegetación.

—Pedro J. Rey
Julio M. Alcántara
Departamento de biología animal, biología vegetal y ecología
Universidad de Jaén

ENTREVISTA

Jane de la jungla

La primatóloga Jane Goodall habla sobre sus 50 años de experiencia con los chimpancés

El 4 julio de 1960, Jane Goodall, a los 26 años de edad, llegó a la reserva de caza de Gombe Stream, en Tanzania, para estudiar el comportamiento de los chimpancés. A través de las vidas emocionantes de Fifi, David Barbagrís y otros chimpancés, demostró que esos simios presentaban numerosas características que se atribuían únicamente a los humanos. Ahora, a sus 76 años, Goodall trabaja para salvar a chimpancés en peligro y a su hábitat. Hace poco, nos pusimos en contacto con ella por teléfono, mientras se hallaba en Hong Kong celebrando los 50 años del inicio de su trabajo en Gombe. Se incluyen aquí algunos fragmentos de aquella conversación.

Cuando llegó a Gombe por primera vez, ¿qué ideas preconcebidas tenía sobre los chimpancés?

Me imaginaba que eran muy inteligentes, aunque nadie sabía mucho sobre su modo de vida en la selva o su estructura social.

¿Cómo hizo para que los chimpancés la aceptasen?

Me sentaba en el suelo y cavaba pequeños hoyos o simulaba comer hojas, cualquier cosa para que no creyeran que estaba interesada en ellos. Nunca traté de acercarme en exceso o con demasiada rapidez. Pasé mucho tiempo en algún lugar donde pudiera observarlos a distancia, vestida siempre del mismo color. Poco a poco fueron acostumbrándose a mi presencia y entonces pude comenzar a estudiarlos de verdad.

Las crías son muy curiosas. Lo demostraron durante los primeros días de mi presencia. Se daban cuenta de la ansiedad de sus madres, pero su curiosidad les venció. Acabaron extendiendo la mano y tocándome; luego se olían el dedo, porque así es como aprenden acerca de su entorno.

¿Qué aspecto le sorprendió más de su comportamiento?

Su enorme parecido con el humano. Muchos se sorprendieron de que fabricasen y utilizasen herramientas. Pero yo ya sabía por las descripciones del psicólogo Wolfgang Köhler que en cautividad suelen utilizar herramientas. Aun así, resultaba emocionante observar ese comportamiento en la selva, además de ver que cazaban y compartían el alimento, porque ello nos permitía obtener financiación para continuar nuestras investigaciones.

Me chocó descubrir que, como nosotros, exhiben un lado muy oscuro y pueden llegar a ser muy violentos, e incluso luchar entre ellos. Grupos diferentes de chimpancés pueden verse envueltos en una especie de guerra primitiva cuya finalidad parece ser el dominio del territorio. Quizá me sorprendieron aún más los ataques de las hembras a los recién nacidos de su propio grupo.

¿Qué diferencia la mente humana de la del chimpancé?

El desarrollo explosivo del intelecto. Se puede lograr que los chimpancés aprendan un leguaje de signos y realicen una serie de actividades en los ordenadores, pero no tiene sentido comparar ese intelecto con el de un humano; mucho menos aún con el de Einstein. Tengo la impresión de que la evolución de nuestra inteligencia se aceleró cuando empezamos a usar el tipo de lenguaje que utilizamos hoy, un lenguaje que nos permite analizar el pasado y hacer planes sobre un futuro lejano.

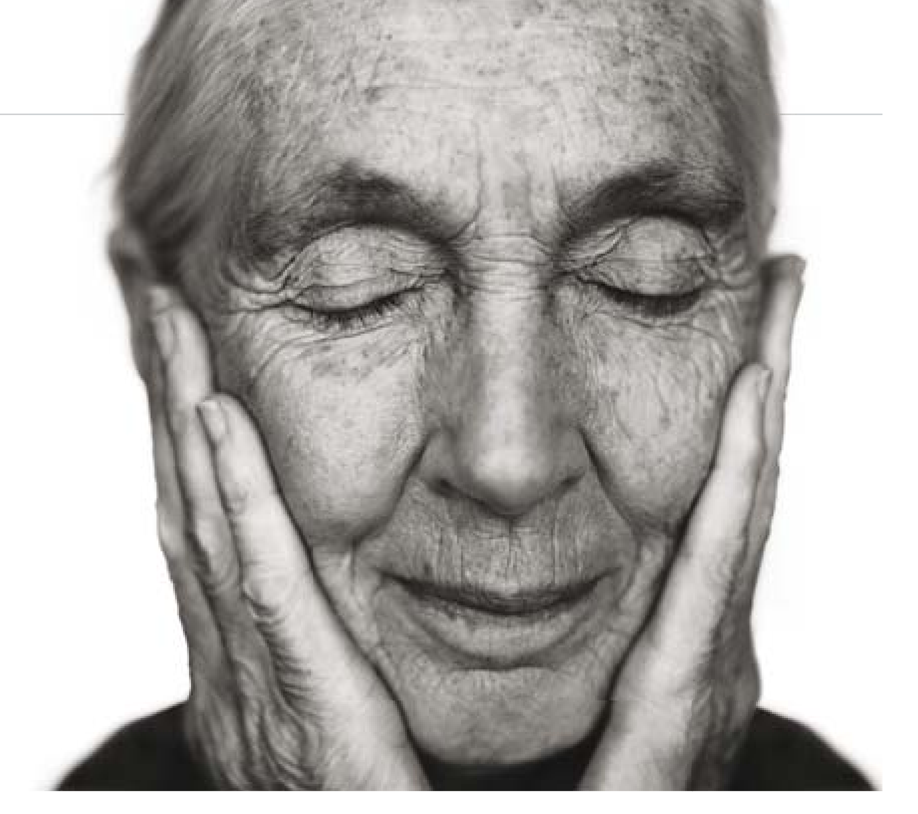
¿Cómo les va a los chimpancés en la selva?

No muy bien. Las amenazas varían según el lugar, pero en la mayor parte de ellos el principal problema se debe a la destrucción del bosque. En la cuenca del río Congo, donde vive la población más importante de chimpancés, el comercio ilegal

de carne de caza constituye otra amenaza, lo que resulta muy desalentador. Además, los chimpancés contraen muchas de nuestras enfermedades infecciosas y, a medida que las empresas forestales construyen carreteras que se adentran en la selva, aumenta el riesgo de esas afecciones en los animales.

¿Qué se está haciendo para proteger a los chimpancés?

En Tanzania, el Instituto Jane Goodall puso en marcha el programa TACARE (del inglés *take care*, «cuidar de»), que está mejorando las condiciones de vida de las personas de los poblados y les ayuda a luchar contra la pobreza. Los aldeanos apoyan nuestros esfuerzos para proteger el bosque: comprenden la importancia de conservar el agua y no talan los árboles. A pesar de sus reducidas dimensiones, Gombe presenta ahora un cinturón verde que crece alrededor del parque, en un espacio antes yermo. Se han empezado a formar unos corredores que se extienden hacia otros bosques tropicales habitados por pequeños grupos de chimpancés. Desconocemos si los animales utilizarán esos corredores, pero al menos les estamos dando esa opción.



PHILIPP HORAK, REDUX PICTURES

Por otro lado, la iniciativa «Reducción de las emisiones debidas a la deforestación y a la degradación de los bosques» (REDD, por sus siglas en inglés), representa un mecanismo para obtener fondos. Estos provendrían de la comercialización de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) por las comunidades que demuestren estar protegiendo sus bosques. Con el dinero que este año hemos recibido de la Real Embajada de Noruega en Tanzania estamos ayudando a algunas comunidades a participar en la iniciativa REDD. Lo hacemos, entre otras maneras, trabajando

con Google Earth Outreach para formar a algunos habitantes de la zona a usar el teléfono Android y otras técnicas con el fin de recopilar datos sobre el CO_2 y hacer un seguimiento de los bosques.

¿Cuáles de sus contribuciones considera más significativas?

Desmontar esa percepción de la acusada diferencia entre nuestra especie y otras criaturas. Los chimpancés nos han ayudado a comprender que la especie humana constituye una parte del reino animal y no una entidad separada de él. Ello ha favorecido nuestro respeto hacia los seres extraordinarios con los que compartimos el planeta.

Los jóvenes de todo el mundo deben darse cuenta de que nuestra conducta individual importa mucho. Si cada persona empezase a reflexionar sobre las repercusiones de sus pequeñas acciones —lo que come, lo que viste, lo que compra, cómo va de A a B— y actuase en consecuencia, esos millones de pequeños cambios crearían el tipo de grandes cambios que necesitamos para mejorar el futuro de nuestros descendientes. Esta idea me mantiene al pie del cañón 300 días al año. La intento transmitir mediante charlas a grupos de jóvenes y adultos, políticos y empresarios; porque no creo que nos quede mucho tiempo. *—Kate Wong*

MATERIALES

Refrigeración respetuosa con el ambiente

Los sólidos magnetocalóricos y barocalóricos ofrecen una buena alternativa a los clásicos fluidos refrigerantes de efecto invernadero

En la actualidad se nos hace difícil concebir una sociedad carente de sistemas eficaces de refrigeración. La vida cotidiana depende en gran medida de la posibilidad de conseguir temperaturas que estén por debajo de las ambientales. Sin embargo, procesos que hoy nos parecen naturales, como la conservación de alimentos en frigoríficos, resultaban impensables no hace tanto tiempo, ya que hasta principios del siglo xx no se desarrollaron los primeros frigoríficos domésticos.

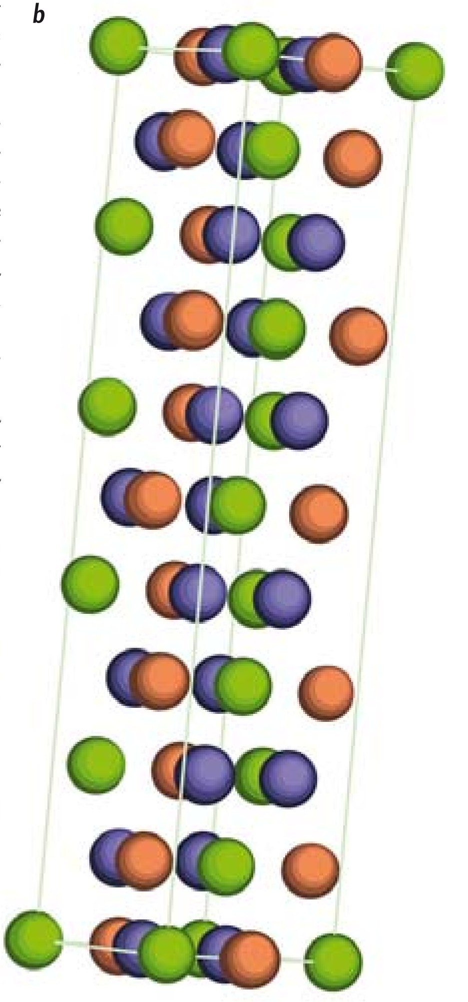
El funcionamiento de la mayoría de los refrigeradores se basa en procesos cíclicos de compresión y expansión de un fluido que conllevan un intercambio de calor. Mediante un dispositivo de intercambiadores térmicos, el calor se absorbe del frigorífico (con el consiguiente descenso de la temperatura) y se cede luego a la atmósfera. El segundo principio de la termodinámica dicta que esta transferencia de calor no puede realizarse a coste cero, sino que precisa el consumo de cierta cantidad de energía.

Durante muchos años, los fluidos refrigerantes utilizados fueron clorofluorocarbonos (CFC). Sin embargo, se descubrió que, a pesar de ser químicamente inertes y no tóxicos, una vez en la estratosfera, resultaban nocivos para la capa de ozono. A raíz del protocolo de Montreal se restringió su uso.

Como sustitutivos de los CFC empezaron a emplearse hidrofluorocarbonos (HFC). Estos, si bien no afectan a la capa de ozono, al presentar una gran capacidad de absorción de radiación de larga longitud de onda, contribuyen de forma notable al efecto invernadero. A pesar de que los HFC representan un pequeño porcentaje de los gases emitidos de efecto invernadero, su acumulación puede ser importante para el cambio climático, puesto que su impacto es mucho mayor que el del dióxido de carbono. El protocolo de Kyoto ha incentivado el desarrollo de sistemas de refrigeración que puedan sustituir a los actuales, basados en fluidos no respetuosos con el medio.

a

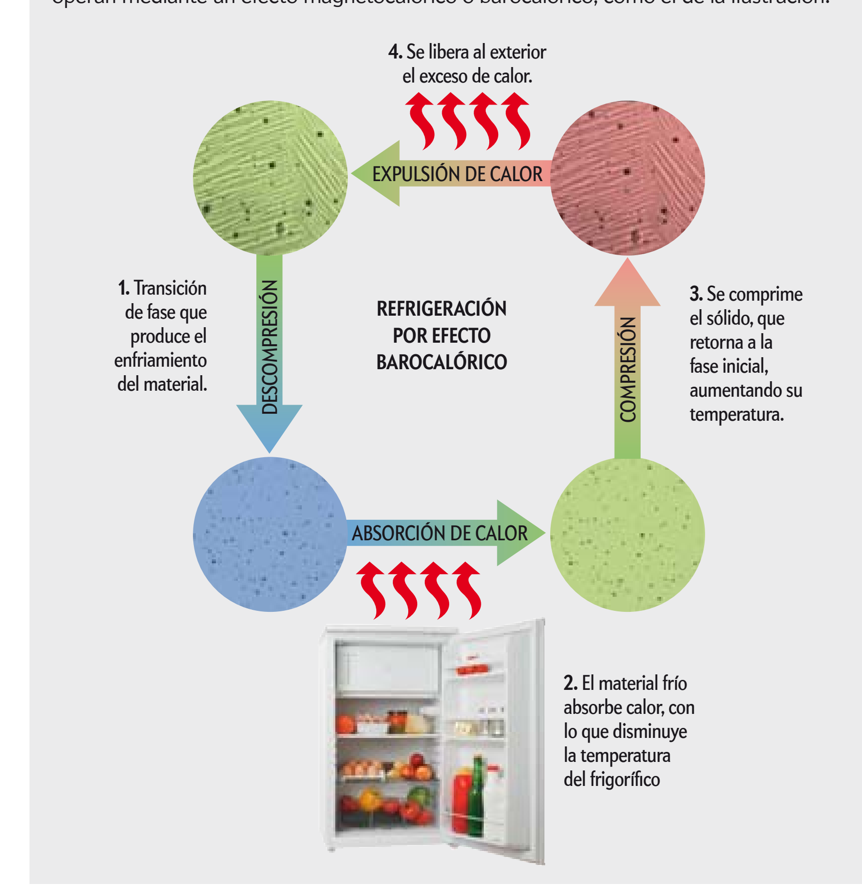
b



Los materiales que a temperatura ambiente presentan respuestas térmicas ante la aplicación de un campo magnético (magnetocalóricos) o de una presión (barocalóricos) abren nuevas vías para el desarrollo de refrigerantes «verdes». Este es el caso de esta aleación de níquel, manganeso e indio (Ni-Mn-In): las posiciones en azul están ocupadas por átomos de níquel; las verdes, de manganeso; y las anaranjadas, por átomos de indio y de manganeso. A temperaturas elevadas, el compuesto adopta una estructura cúbica ordenada (*a*). Conforme desciende la temperatura, se produce una transición de fase reversible hacia una estructura monoclínica modulada (*b*), que comporta una variación de la imanación (asociada al momento magnético de los átomos de manganeso), el volumen, la entropía y otras propiedades.

NUEVOS REFRIGERANTES SÓLIDOS

Los frigoríficos suelen basar su funcionamiento en hidrofluorocarbonos, fluidos refrigerantes que contribuyen de forma notable al efecto invernadero. Para reducir esta contaminación, se están desarrollando refrigerantes sólidos respetuosos con el ambiente, que operan mediante un efecto magnetocalórico o barocalórico, como el de la ilustración.



MISTIKAS/ISTOCKPHOTO (frigorífico)

Efecto magnetocalórico

Una de las alternativas más prometedoras parece hallarse en la utilización de sólidos. El mayor esfuerzo se ha invertido en el desarrollo de materiales que presentan efecto magnetocalórico, que no es más que la respuesta térmica resultante de cambios de imanación (cambios adiabáticos de temperatura o cambios isotermos de entropía, resultantes de la aplicación de un campo magnético). Este efecto, conocido ya desde finales del siglo XIX, se ha utilizado para la obtención de temperaturas muy bajas. La posibilidad de emplearlo para la refrigeración alrededor de la temperatura ambiente se vio impulsada a finales de los noventa, cuando el grupo de Vitalij K. Pecharsky y Karl A. Gschneidner, del Laboratorio Ames (Iowa), descubrieron un material que presenta un efecto magnetocalórico gigante alrededor de la temperatura ambiente. Los grandes cambios de entropía que ocurren en este material se deben a una transición de fase que conlleva un cambio de orden magnético y de estructura cristalina. Motivados por este hallazgo, numerosos equipos de investigación de todo el mundo acometieron la búsqueda de otros materiales aptos para la refrigeración magnética alrededor de la temperatura ambiente.

Entre los materiales que se han propuesto destacan las aleaciones basadas en níquel (Ni) y manganeso (Mn), con la adición de un tercer elemento (Ni-Mn-*Z*, siendo *Z* un elemento de las columnas IIIA a VA de la tabla periódica). Estas aleaciones presentan cambios de fase reversibles entre estructuras cristalinas. La transición de fase comporta en el material una variación de la imanación, el volumen, la entropía y otras propiedades.

Las aleaciones Ni-Mn-*Z* ya habían sido objeto de un interés creciente debido a sus propiedades de memoria de forma magnética. Y hace algunos años se demostró que presentaban un efecto magnetocalórico gigante. En 2005 se observó un comportamiento anómalo: mientras que los materiales magnéticos suelen calentarse



al aplicar un campo magnético, la mayoría de las aleaciones Ni-Mn-*Z* se enfrían. Este fenómeno, el «efecto magnetocalórico inverso», se describió en junio de aquél año en la revista *Nature Materials*. Dicho comportamiento anómalo se debe a la disminución de la imanación que tiene lugar cuando ocurre la transición de la fase de alta a la de baja temperatura, propiciada por una variación en la separación entre los átomos de manganeso.

Efecto barocalórico

Además del efecto magnetocalórico característico de los sólidos magnéticos, los materiales sólidos pueden presentar efectos calóricos asociados a otras propiedades, es decir, cambios de entropía o de temperatura resultantes de la aplicación de presión, campos eléctricos, etcétera. Estos efectos han sido tradicionalmente poco estudiados, ya que se espera que sean de pequeña magnitud. Sin embargo, tal y como ocurre en el caso magnético, es posible que el fenómeno se vea ampliado en las cercanías de una transición de fase que involucre un cambio relevante de la propiedad física termodinámicamente conjugada del campo aplicado. Con esa idea, en 2008 se demostró la posibilidad de un efecto calórico notable asociado a la aplicación de un esfuerzo uniaxial en una aleación metálica.

Por otra parte, en un trabajo reciente fruto de la colaboración entre la Universidad de Barcelona, la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Duisburg-Essen en Alemania, publicado en mayo de 2010 en *Nature Materials*, se ha demostrado que una aleación de Ni-Mn-In presenta, además de efecto magnetocalórico, un efecto barocalórico de igual o mayor magnitud para presiones hidrostáticas moderadas. El origen de dicho efecto barocalórico (cambio de entropía resultante de una presión hidrostática) no es otro que una transición de fase entre estructuras cristalinas que, además de un cambio de imanación, comporta un cambio de volumen. De hecho, se espera que muchos de los materiales con efecto magnetocalórico gigante presenten también un efecto barocalórico notable, ya que a menudo los cambios magnéticos en estos materiales vienen acompañados de cambios de volumen importantes.

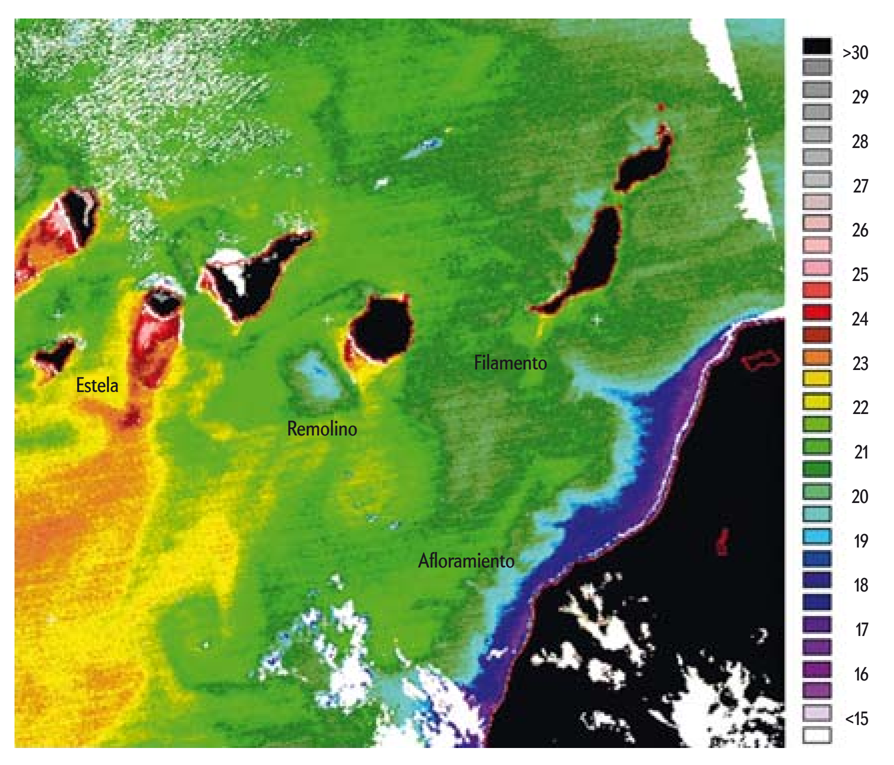
Estamos convencidos de que el uso de diversas propiedades físicas para la producción de frío debería facilitar el desarrollo de materiales asequibles que permitan la comercialización de sistemas domésticos e industriales de refrigeración en estado sólido. Esperamos que en un futuro próximo dichas técnicas sustituyan los sistemas actuales por otros más respetuosos con el ambiente.

—Lluís Mañosa y Antoni Planes
Facultad de Física
Universidad de Barcelona

OCEANOGRAFÍA

Vigilancia del mar desde el espacio

Las imágenes tomadas por satélites permiten estudiar y predecir el movimiento de las aguas oceánicas



Temperatura superficial del mar de la zona de las islas Canarias. Se muestran varias estructuras oceanográficas: estelas, remolinos, filamentos y afloramientos.

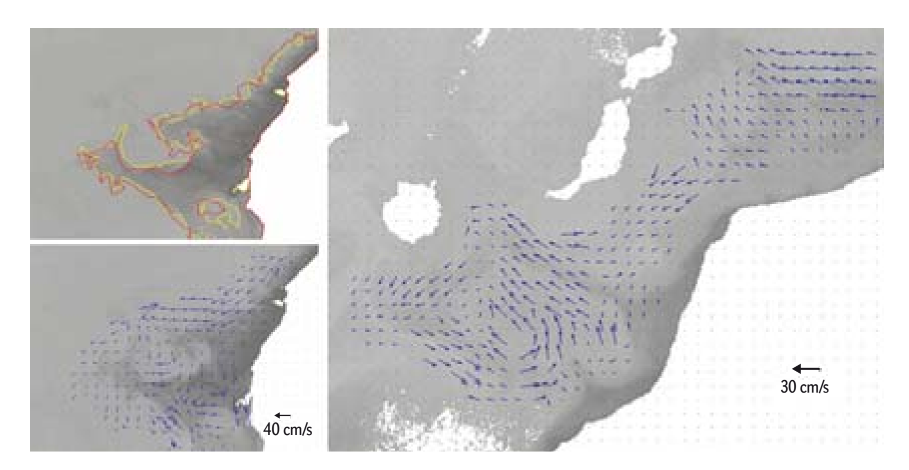
El conocimiento de nuestros mares se remonta muy atrás en el tiempo. En la antigüedad, la mayoría de las rutas comerciales o las que seguían los exploradores europeos se basaban en el conocimiento de los vientos y las corrientes marinas. Hasta finales del siglo XIX no nació la oceanografía, que ha pasado por varias etapas hasta llegar a nuestros días. En los años setenta surgió la teledetección. Comenzaba la era de los satélites de observación de la Tierra, que ha revolucionado la oceanografía clásica. La aportación de datos que complementan las mediciones tradicionales ha facilitado el estudio de la interacción de procesos y el desarrollo de modelos matemáticos.

De los parámetros que se miden desde el espacio, uno de los que revisten mayor importancia para el estudio cuantitativo de los océanos es la temperatura superficial del mar (TSM). Estos datos térmicos tienen una amplia variedad de aplicaciones, entre otras: modelos atmosféricos y climáticos, investigación en oceanografía física y biológica, actividad comercial relacionada con pesquerías, medidas de corrientes superficiales y estudios de polución.

Estructuras costeras

Dentro del entorno marino, despiertan un gran interés las regiones costeras, ya que son las más productivas. Sobre todo aquellas donde se producen afloramientos, puesto que generan riqueza pesquera (el flujo ascendente de aguas ricas en nutrientes conlleva una elevada productividad primaria). Las imágenes de TSM o de color del océano permiten identificar afloramientos, filamentos, remolinos y otras estructuras mesoescalares cercanas a la costa. Las aguas afloradas en la superficie costera presentan temperaturas inferiores a las aguas alejadas de la costa.

En nuestro grupo de investigación de procesado de imágenes y teledetección hemos desarrollado una metodología automática para la detección, seguimiento y análisis de este tipo de estructuras oceanográficas mediante imágenes multisensoriales y multitemporales de teledetección. Esta herramienta ofrece aplicaciones también en otros ámbitos: estudios ambientales (seguimiento de manchas de petróleo u otros vertidos contaminantes), de biología marina e incluso en misiones de búsqueda y rescate.



Vectores de movimiento de las aguas para la zona del cabo Ghir (*izquierda*) y Canarias (*derecha*). Se aprecia la evolución de los afloramientos a partir de dos imágenes consecutivas del sensor MODIS.

Estudio estacional y temporal

Dadas las consecuencias planetarias del cambio climático, es imprescindible evaluar su impacto sobre los afloramientos, pues estos condicionan en gran medida la actividad pesquera, la producción primaria y secundaria, y la relación entre la atmósfera y los océanos.

Mediante nuestras técnicas de teledetección hemos llevado a cabo un estudio sobre los afloramientos de la costa del noroeste africano. Para ello se han utilizado datos semanales de TSM tomados durante veinte años (de 1987 a 2006) por el sensor AVHRR. Además, se han recabado datos de presión de viento a partir de los sensores AMI-Wind y SeaWinds a bordo de los satélites ERS-1/ERS-2 y QuikSCAT, respectivamente.

A partir de esos datos, se ha calculado el promedio temporal de la temperatura del mar y el índice de afloramiento (diferencia entre la temperatura en la costa y mar adentro) en función de la latitud y la semana del año. Cuanto más negativo es el índice, mayor es la intensidad del afloramiento. Según los resultados, el afloramiento es persistente a lo largo del año entre las latitudes septentrionales de 20º y 33º, aunque con menor intensidad en invierno. Entre 12º y 20º, el afloramiento muestra un claro comportamiento estacional: en verano desaparece completamente.

Se ha realizado también un estudio temporal para cuantificar la variabilidad a largo plazo. Se ha observado una intensificación de los afloramientos desde 1987 hasta 2006 a lo largo de toda la costa noroeste de África. El cambio acumulado tras 20 años en el índice de afloramiento oscila entre los −0,2 ºC y los −0,7 ºC, según la latitud.

Dinámica costera

Además del análisis de cada imagen de forma independiente, para poder estudiar y modelar fenómenos dinámicos es necesario el tratamiento de series multitemporales y multisensoriales de imágenes de teledetección. Así, uno de los aspectos de mayor importancia en oceanografía es el estudio de la circulación oceánica y, por tanto, la estimación de las velocidades superficiales de las corrientes. Estas velocidades desempeñan una función notable en un gran número de fenómenos relacionados con el océano y el clima, por lo que condicionan las misiones de búsqueda y rescate, la contención de vertidos contaminantes, el control y la explotación de los recursos marinos, etcétera.

Mediante la combinación de técnicas de segmentación y estimación de movimiento, se ha desarrollado una herramienta que permite obtener de forma fiable las corrientes superficiales a partir de secuencias de imágenes de teledetección. Se ha validado en secuencias de los sensores AVHRR y MODIS para las zonas de Canarias y el cabo Ghir, y para la región de la corriente del golfo de México. La aplicación de esta técnica puede resultar de gran utilidad en estudios a corto y largo plazo de la dinámica costera.

El océano esconde todavía secretos. Sin embargo, el lanzamiento de nuevos satélites de observación de la Tierra nos permitirá alcanzar un conocimiento cada vez más profundo de nuestros mares, que arrojará luz sobre los fenómenos oceánicos y su efecto sobre el clima.

—Javier Marcello Ruiz
Francisco Eugenio González
Departamento de señales y comunicaciones
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

INNOVACIÓN

Ideas que cambian el mundo

Un decálogo de reflexiones, tendencias y técnicas que podrían dar una nueva orientación a nuestras vidas

La tecnología nos rodea por doquier y ensancha cada vez más los territorios de lo posible. Pero de vez en cuando, un invento o una nueva forma de entender las cosas provocan efectos desmesurados y crean en la historia una discontinuidad, un «antes» y un «después». La máquina de vapor, el transistor, la Red... Cada una de esas ideas, que parecen haber surgido de la nada, ha cambiado de forma fundamental nuestro mundo y nuestras vidas. Entre el vasto semillero de innovaciones, ¿llegará alguna a transformar el mundo del mañana?

Proponemos aquí diez ideas o técnicas inéditas que podrían imponer nuevas normas. ¿Será posible convertir la basura en combustible mediante robots? ¿Nos ayudarán los videojuegos a mejorar nuestras conductas? ¿Y si el ADN «basura» resultase tan importante como los propios genes? ¿Residirá en los insectos el secreto para eludir los ataques cibernéticos?

MARK HOOPER



COMPUTACIÓN

El juego de la vida

Las rutinas de los videojuegos aplicadas a las actividades cotidianas pueden ayudarnos a vivir mejor

John Pavlus

Un día no muy lejano, mientras nos cepillamos los dientes por la mañana, podremos ver en el espejo del cuarto de baño, junto a las noticias del día, una tabla de puntuaciones que nos permita comparar nuestra «huella de carbono» con la de nuestros vecinos. El cepillo eléctrico emitirá una señal sonora para informarnos que, por haberlo utilizado dos veces al día durante los últimos seis meses, hemos obtenido un descuento de un diez por ciento en la próxima revisión odontológica. Tras ducharnos (brevemente, para mantener nuestra envidiable puntuación en ahorro energético, con los beneficios fiscales que ello conlleva), nos vestiremos e iniciaremos una sesión en el ordenador de nuestra oficina doméstica, desde la que asistiremos por videoconferencia a la reunión matinal.

Bajo la forma de avatar, apareceremos en la pantalla al lado de nuestros compañeros de trabajo y, aprovechando nuestra presencia virtual, responderemos a los correos electrónicos durante las reuniones sin parecer groseros. Y dado que los «objetivos de ventas» habrán sido reemplazados por «contadores de vida» personalizados (que destacarán en la pantalla y reflejarán en tiempo real las respuestas positivas de los clientes), nos sentiremos con mayor motivación y control de la situación al realizar nuestras tareas diarias.

En opinión de Jesse Schell, investigador en juegos de la Universidad Carnegie-Mellon, será inexorable que en el futuro casi todos los aspectos de nuestra vida contengan elementos propios de los videojuegos. Schell y numerosos diseñadores y psicólogos están convencidos de que la clave de una sociedad con ciudadanos más sanos y productivos, y más integrados en ella, estriba en llevar el juego competitivo a la vida cotidiana. Según Schell, los juegos suelen considerarse algo banal, pero en realidad nos brindan la oportunidad de aplicar nuestras facultades a la resolución de problemas. Si el juego está bien diseñado, puede abordarse con él cualquier dificultad, bien se trate de modificar nuestra dieta, aprender un idioma, comprender los conflictos de Oriente Medio o reducir nuestra «huella de carbono». Son problemas que las personas suelen evitar o no pueden solucionar. Los juegos tienen la capacidad de cambiar la situación, pues, por definición, todo sistema interactivo eficaz provoca el deseo de participar en él.

Un aspecto esencial de este nuevo juego de la vida es la proliferación de datos en tiempo real a partir de dispositivos móviles con GPS activado, sensores baratos integrados en una red y otras técnicas. «Ese conjunto de datos de carácter personal nos permite empezar a medir conductas que hasta ahora solo podíamos estimar mediante juegos o mundos virtuales», declara Dan Ariely, profesor de economía conductual en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. «Es posible ver con detalle lo que motiva a los individuos y aplicar ese conocimiento a actividades que no les suelen entusiasmar, como tomar medicamentos con regularidad o controlar el consumo de energía».

Para «ludificar» el mundo real no bastan los avatares y las puntuaciones. Es necesaria una realimentación rápida e individualizada. Los juegos eficaces «explotan de forma inteligente tendencias motivadoras propias de los humanos», apunta Richard Ryan, psicólogo clínico. En los juegos, las puntuaciones, más que recompensas, originan una realimentación instantánea que induce a lograr mayor destreza. «Los humanos somos animales curiosos; en nuestra naturaleza hay una propensión a jugar y dominar el medio que nos rodea», añade Ryan. «Los juegos son medios eficaces para despertar la motivación intrínseca que hemos adquirido a lo largo de la evolución.» Según los psicólogos, cuando recurrimos a estos incentivos internos, nos sentimos dueños de la situación y pensamos que nuestros actos tienen consecuencias inteligibles.

No obstante, Schell admite que los juegos que en teoría funcionan bien pueden volverse fastidiosos y contraproducentes en poco tiempo. A su juicio, la mejor manera de evitarlo consistiría en tender puentes entre los diseñadores de juegos más talentosos y los líderes en tecnologías desligadas del entretenimiento. Byron Reeves, psicólogo y experto en juegos, apoya esta idea: «No existen mecanismos psicológicos que funcionen en los juegos y dejen de hacerlo en la vida real. Solo poseemos un cerebro. Los centros de recompensa que se activan en los juegos bien diseñados lo harán también cuando nos impliquemos en cualquier sistema interactivo bien concebido».

De ahí que los investigadores se muestren optimistas ante las posibilidades de la «ludificación» para mejorar de forma radical nuestro mundo. Microsoft ha utilizado un programa de este tipo para elevar hasta un 50 por ciento la fidelización de los empleados de una de sus divisiones. *First Things First* («Lo primero es lo primero») es un plan de estudios de matemáticas que se está utilizando con carácter experimental en cinco escuelas de Kansas y Texas. Expone el álgebra y la trigonometría de la enseñanza secundaria en una secuencia de 101 niveles e incita a los estudiantes a dominar los conceptos fundamentales a su propio ritmo antes de pasar al nivel siguiente, como ocurre en los videojuegos. Desde la aplicación del plan, hace cuatro años, las calificaciones de los estudiantes en las pruebas de matemáticas han mejorado en porcentajes bidígitos en todas esas escuelas; en una de ellas, casi un 40 por ciento. Ryan está colaborando con Immersyve, una asesoría de juegos de carácter sanitario en la creación de un «médico virtual» que se vale de una interfaz de tipo avatar para lograr que los pacientes se sientan menos intimidados cuando buscan asesoramiento médico.

«La ludificación completa no se producirá a causa de un solo sistema; llegará después de un millón de innovaciones en centenares de direcciones, cada vez que se invente un sensor», opina Schell. Cada nueva opción nos hará un poco mejores.

COMPUTACIÓN

Los humanos vencen a los ordenadores

Mediante rompecabezas virtuales, las personas resuelven mejor los problemas científicos *John Pavlus*

En la comparación de las capacidades de humanos y máquinas, se acepta desde hace años que los primeros son insuperables en el reconocimiento de rostros y en la asociación de formas y configuraciones, mientras que los segundos imperan en todo lo relacionado con la manipulación de números. Mas tal vez ya no sea así. El éxito de Foldit («Pliégala»), un rompecabezas virtual creado por biólogos e informáticos de la Universidad de Washington, demuestra que la intuición humana consigue superar a los algoritmos de ordenador en los problemas científicos complejos.

Foldit proyecta en una pantalla una proteína parcialmente plegada. Los jugadores, que no son científicos, han de retorcerla y plegarla, mediante una serie de reglas sencillas, hasta conferir a la proteína una forma ideal. Los jugadores no solo determinaron la forma correcta más deprisa que algoritmo alguno (una búsqueda de todas las posibilidades por «fuerza bruta» exigiría millones de años), sino que intuyeron también soluciones que un ordenador seguramente no habría descubierto. «Para plegar una proteína y darle la forma correcta, tal vez haya que doblarla primero en un par de direcciones en apariencia erróneas», explica Seth Cooper, informático de la Universidad de Washington que participó en la invención de Foldit. «Al jugar con un objeto virtual, una persona puede visualizar mentalmente la imagen de conjunto y reconocer esas soluciones ingeniosas».

TRANSPORTE

Todo con peaje

La construcción de nuevas vías no evitará los atascos, pero tal vez lo hagan las tarifas variables *Tom Vanderbilt*

LAS AUTOVÍAS DEL FUTURO se parecerán mucho a las actuales, pero sin duda no serán gratuitas. Bern Grush, fundador de Skymeter, una compañía de Toronto que produce equipos de GPS para medir la circulación por vías públicas, lo explica así: «Podremos acceder sin cargos al garaje de nuestra vivienda. Pero cuando recibamos una visita, nuestro invitado deberá pagar por el trayecto recorrido desde su hogar al nuestro».

La aparición de técnicas inalámbricas de localización precisa, como el GPS, consiente ahora calibrar los costes reales del movimiento de vehículos y de las vías públicas. Se podrá introducir así un «peaje dinámico por uso vial», lo que en esencia significa que habrá que pagar las carreteras según la distancia recorrida, en lugar de otros medios, como la imposición sobre combustibles o por la adquisición del vehículo. Por el momento solo está en servicio un pequeño número de programas, pero los urbanistas consideran que la idea podría cambiar nuestra forma de entender la circulación y convertir el negro fastidio de los atascos en viajes de placer. Investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts y de General Motors expusieron esta perspectiva a principios de 2010, en «Reinvención del automóvil», un estudio que defendía un sistema transparente de costes de los viajes para optimizar el uso de las carreteras, con la consiguiente reducción de las congestiones de tráfico y siniestralidad.

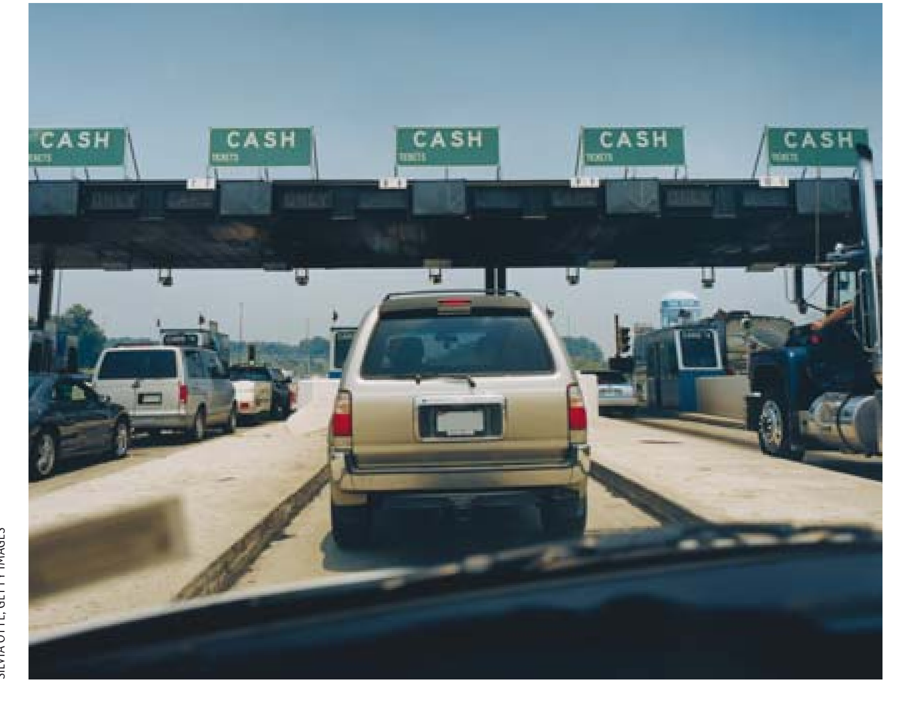
Que el usuario de la vía asumiera el coste real de su desplazamiento supondría un cambio radical respecto a la situación actual. El mantenimiento de las carreteras corre a cargo del Estado; los conductores pagan la misma cantidad por kilómetro si la vía está saturada o vacía; los seguros suelen tener el mismo coste para quienes usan el auto una vez al mes que para quienes lo hacen a diario y la tarifa de los estacionamientos en las horas punta coincide con las de valle. En EE.UU., el impuesto sobre los combustibles, que durante un siglo ha servido para financiar las vías públicas, ha caído desde un máximo de unos 3,9 centavos de dólar por milla en 2007 (unos 2 céntimos de euro por kilómetro) hasta menos de 1 centavo (0,5 céntimos de euro) en la actualidad, según Randal O'Toole, analista del Instituto Cato. Paralelamente, los atascos han ido aumentando sin cesar en las ciudades y en su periferia. Como señala Edward Glaeser, economista de Harvard, los bienes escasos (las vías urbanas) se pueden racionar por precio o por tiempos de espera. La segunda es, por ahora, la solución adoptada en el caso del tráfico.

Los primeros estudios orientativos han ofrecido resultados alentadores. El gobierno holandés pretende poner en práctica en 2016 un sistema de «pago por kilómetro» basado en GPS. Un estudio preliminar de seis meses de duración efectuado en Eindhoven el año pasado demostró que, como consecuencia de la aplicación de esa tarifa, el 70 por ciento de los usuarios modificaban su conducta evitando las horas punta o circulando por carreteras menos concurridas. El gobierno holandés espera que, cuando el programa se amplíe al resto del país, se logre una reducción del 58 por ciento en los retrasos por tráfico.

Los sistemas de pago por kilómetro podrían utilizarse también en beneficio del ambiente. En Alemania, a los camiones de gran capacidad se les cobra no solo por kilómetro recorrido, sino también por sus emisiones (los que más contaminan pagan más), con el resultado de que el porcentaje de viajes efectuados por camiones menos contaminantes se ha elevado desde el 1 por ciento en 2005, cuando comenzó el programa, hasta más del 55 por ciento en la actualidad.

Pero la caída del gobierno de Holanda a principios de 2010 ha sembrado de dudas el futuro de este programa y nos recuerda que los políticos quieren fotografiarse inaugurando carreteras, no nuevas cabinas de peaje. Además, los costes tecnológicos pueden resultar prohibitivos. En un ensayo, una compañía de seguros del Reino Unido, Norwich Union (en la actualidad Aviva), se valió de dispositivos instalados en los coches para determinar el lugar y momento de los desplazamientos de jóvenes conductores, así como su forma de conducir. La compañía se sirvió de acelerómetros para penalizar con tarifas más elevadas a los conductores agresivos. A pesar de que las indemnizaciones por siniestros disminuyeron un 30 por ciento durante el ensayo, el elevado coste de los elementos de telemetría hizo inviable el programa.

Un sistema de parquímetros «inteligentes» podría mitigar otra de las pesadillas de la circulación urbana: el estacionamiento en la calle. Donald Shoup, de la Universidad de California en Los Angeles, sostiene que el aparcamiento gratuito o de bajo coste incrementa la congestión urbana, pues los conductores no cesan de circular hasta dar con uno de ellos. Para evitar este fenómeno, en San Francisco se está aplicando el «estacionamiento dinámico», que se vale de sensores para rastrear la presencia de automóviles en los aparcamientos y calibrar la demanda total; el gobierno municipal determina entonces una tarifa para asegurar una ocupación constante del 85 por ciento. Los precios varían según la hora y el día de la semana, aunque siempre se fijan por adelantado, lo que hace más fácil predecir el tiempo que se perderá circulando antes de aparcar.



SILVIA OTTE, GETTY IMAGES



BIOTECNOLOGÍA

Secuenciador genómico

Un método nuevo de secuenciación del ADN podría revolucionar la genética *Elizabeth Svoboda*

Pese a los diez años transcurridos desde la primera secuenciación del genoma humano, la determinación de los vínculos entre genes y enfermedades concretas se está haciendo esperar [*véase* «Revolución aplazada», por Stephen S. Hall; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010]. Muchos opinan ahora que los auténticos avances en genómica no serán fruto de sencillas relaciones causales del tipo «X provoca Y», sino de un nutrido conjunto de correlaciones estadísticas obtenidas de millones de genomas. Identificar las posibles interacciones de nuestro código genético con el ambiente permitirá conocer con mayor profundidad nuestra biología.

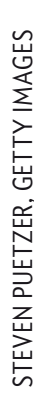
Para ello se necesitará un secuenciador genómico asequible, un sistema que realice la tarea por menos de 1000 euros. Hoy por hoy, la secuenciación de un genoma cuesta entre 5000 y 15.000 euros, un gran avance si se compara con los 2000 millones de euros invertidos en la primera secuenciación, pero todavía lejos del objetivo deseable. IBM y Roche intentan lograrlo a partir de un diseño nuevo de secuenciador, el *DNA transistor*. Las máquinas actuales son del tamaño de un lavaplatos y precisan reactivos caros para analizar los genes, separados en millares de pequeños fragmentos. El nuevo secuenciador de ADN se basa en una metodología muy sencilla. Una molécula de ADN intacta va desfilando a través de un orificio, de 3 nanómetros de paso, situado en el centro de un chip de silicio. Conforme el ADN va atravesando el poro, un sensor eléctrico va leyendo sus unidades moleculares (las bases) de una en una.

Otros laboratorios han experimentado con métodos de secuenciación similares, basados también en nanoporos, pero les ha resultado difícil controlar la velocidad de paso del ADN a través del poro. El equipo de IBM ha inventado un método que saca partido de la carga negativa del ADN natural. «Se nos ocurrió que si dentro del poro se definían electrodos (delgadas capas metálicas separadas por material aislante), ese campo eléctrico podría interactuar con el ADN», explica Gustavo A. Stolovitzky, uno de los científicos del proyecto. El campo eléctrico atrapa el ADN, cargado negativamente, y lo mantiene fijo en el lugar. Al suprimir el campo, el filamento de ADN prosigue su avance a través del orificio hasta que la base siguiente se alinea con él, lista para ser secuenciada. En ese momento reaparece el campo eléctrico y el proceso se repite a lo largo de toda la hebra.

La técnica dista aún de la perfección. El poro ha de generar un intenso campo eléctrico para mantener fijo al ADN. Pero la elevada tensión necesaria para crearlo puede provocar una ruptura dieléctrica: saltan chispas que cortocircuitan el campo, algo especialmente probable en distancias tan pequeñas. «Sucede como en una nube muy próxima a la Tierra, sobre la que tiende a descargar un rayo», comenta Stolovitzky. Se están buscando materiales para que los electrodos soporten las cargas eléctricas necesarias.

A pesar de estas dificultades, los observadores de la industria consideran que el dispositivo representa un método rápido, económico y eficaz para secuenciar el genoma. «Con él se reduce el número de pasos de la secuenciación; viene a ser como descifrar, letra por letra, el ADN», afirma Bruce Schiamberg, consultor que evalúa las posibilidades comerciales de las innovaciones biotecnológicas. «No existen costes de reactivos ni de instrumentos ópticos para leer los marcadores fluorescentes. Todo es más rápido».

El invento está en camino de ofrecer, dentro de uno o dos años, una secuencia genómica completa por menos de 1000 euros. Stolovitzky opina que ayudará a establecer vínculos entre los genes, la propensión a padecer ciertas enfermedades y los tratamientos farmacológicos ideales contra ellas. Las compañías farmacéuticas, al disponer de correlaciones estadísticas más fiables, podrán orientar mejor el desarrollo de principios activos, pues ya sabrán sobre qué regiones concretas deberán actuar sus nuevos medicamentos. Stolovitzky señala uno de los primeros éxitos: la herceptina, un tratamiento del cáncer de mama que evita la sobreexpresión del gen *HER2*. «Estos ejemplos se cuentan con los dedos», añade, «y quisiéramos que se convirtieran en algo habitual».





SALUD PÚBLICA

Un filtro germicida

Materiales nuevos prometen un mejor abastecimiento de agua potable en todo el mundo *Melinda Wenner Moyer*

EN NUESTRO MUNDO, una de cada seis personas carece de acceso al agua potable. De ahí que, a escala global, la principal causa de mortalidad sea la disentería, consecuencia del nulo o deficiente tratamiento de las aguas residuales. El problema se resolvería mediante filtrado, pero los filtros disponibles suelen ser demasiado caros para distribuirlos en cantidad suficiente. No obstante, una combinación de nanotecnología y materiales de bajo precio ha permitido desarrollar hace poco unos filtros móviles que se podrían fabricar por menos de un céntimo.

Casi todos los filtros de potabilización tradicionales están dotados de poros diminutos que atrapan las bacterias. Esos poros tienden a obturarse, lo que exige un costoso mantenimiento. Pero Yu Cui ha descubierto una forma de destruir los gérmenes con el empleo de plata y electricidad. Cui, experto en ciencia de los materiales de la Universidad de Stanford, ha introducido tejido de algodón corriente en una mezcla de microtúbulos de carbono y nanohilos de plata, que conduce la electricidad. La plata opera como eficaz bactericida, debido a que sus iones dañan el material genético. Una ligera corriente eléctrica (alimentada por dos baterías de nueve voltios) destruye las membranas celulares, con lo que se consigue una mayor potencia germicida. En ensayos de laboratorio, el filtro de Cui eliminó del agua más del 98 por ciento de bacterias *E. coli*. Debido al gran tamaño de los poros del algodón, el filtro es 80.000 veces más rápido que los filtros que atrapan microorganismos.

Otro invento aún más barato consiste en una especie de bolsita de té llena de gránulos de carbono recubiertos con un germicida. Investigadores de la Universidad de Stellenbosch, en Sudáfrica, dieron con un procedimiento para encapsular los germicidas dentro de nanofibras. Lograron así aumentar la superficie activa y la captura de bacterias y otras sustancias tóxicas. El filtro encaja en el cuello de una botella normal y cuesta menos de medio céntimo por unidad. Cada bolsita permite depurar un litro de agua contaminada. Esta técnica está siendo ensayada por la oficina sudafricana de estándares, tras lo cual los investigadores se proponen distribuirla a las comunidades que la necesiten.

ROBÓTICA

Un robot errante y vegetariano

Genera electricidad engullendo astillas, hojas y otras fuentes de biomasa *John Pavlus*

TAL VEZ LLEGUE PRONTO el día en que robots autónomos se dediquen a merodear por el planeta en busca de biomasa en bruto que consumirán para generar electricidad. Tal es, al menos, la visión del sistema de robot táctico energéticamente autónomo (EATR, por sus siglas en inglés). «Piense en el robot de la película *WALL-E*, pero imagine que en lugar de compactar basura, utilizase esta de combustible para generar electricidad», explica Robert Finkelstein, director del Laboratorio de Sistemas Inteligentes de la Escuela Clark de Ingeniería, en la Universidad de Maryland, y presidente de Robotic Technology, la compañía que está desarrollando el EATR. El robot dispone de programas que le permiten reconocer visualmente su «alimento» preferido (ramas secas y astillas de madera, hojas muertas y otros residuos vegetales) y diferenciarlo de materiales inútiles, como piedras, restos animales o metales. A continuación, por medio de un brazo robótico dirigido por un sistema láser de guiado a corta distancia, el robot agarra los restos vegetales y los deposita en una tolva, y de allí los transfiere a un motor de combustión externa que a su vez carga una batería eléctrica instalada a bordo.

Estos generadores eléctricos autónomos podrían ofrecer una enorme ayuda en las operaciones militares y civiles, e incluso científicas, asegura Finkelstein. «En los años venideros, cada soldado estadounidense va a utilizar diariamente el equivalente a 120 pilas de tipo AA para alimentar sus equipos de comunicaciones y de apoyo», prosigue. «Un robot EATR reduciría en gran medida el esfuerzo logístico de suministrar esa energía en localidades remotas, porque podría buscar y consumir vegetación mientras el resto de la unidad descansa». La financiación del proyecto EATR procede de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés).

Los robots «vegetarianos» podrían también trabajar para el ambiente. El Servicio Forestal estadounidense desea un EATR montado sobre patas que pueda desplazarse por el campo sin dejar huellas de rodadura. «Las patas le permitirían deambular por terreno desigual sin dañarlo tanto como las ruedas u orugas de los vehículos militares», aclara Finkelstein.

En la actualidad, el EATR se encuentra confinado en una plataforma de pruebas en la Universidad de Maryland. Finkelstein espera disponer de un prototipo operativo con capacidad de forrajeo y movilidad plena hacia el 2012. La idea se antoja un tanto repulsiva, pero Finkelstein opina que un mundo de robots autosuficientes no solo es deseable, sino inevitable. «Disponemos ya de robots domésticos que se conectan por sí solos a una toma de corriente sin nuestra intervención. Se trata de la misma idea, aunque llevada al siguiente nivel».



INFORMÁTICA

Inspirados en la naturaleza

Programas que ayudan a gestionar nuestra inmensa biosfera informática

John Pavlus

LOS INFORMÁTICOS, en su esfuerzo para gestionar nuestro mundo digital cada vez más complejo, buscan la inspiración en la naturaleza. «La vida funciona a base de luz solar e información», afirma Janine Benyus, presidenta del Instituto de Biomimética, en Montana. Cada especie evoluciona sin cesar y busca la forma óptima de sobrevivir en un determinado hábitat. Y añade: «El estudio de los organismos se presta para hallar nuevas vías de solución a los problemas que plantea el procesamiento de la información».

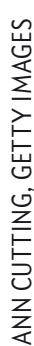
A primera vista, podría parecer que las células dendríticas nada tienen que ver con la seguridad informática. Pero estas células se encargan de alertar al sistema inmunitario de los mamíferos ante la presencia de patógenos invasores. Julie Greensmith, informática de la Universidad de Nottingham, ha diseñado un «algoritmo de célula dendrítica» que detecta virus informáticos y otros programas maliciosos siguiendo las pautas por las que nuestro sistema inmunitario percibe los virus reales.

Las hormigas y otros insectos sociales han servido de inspiración a otro equipo de investigadores en seguridad cibernética, del Laboratorio Pacific Northwest, en Richland, Washington. Han creado «hormigas digitales» que circulan por una red informática, de la misma manera que las hormigas reales merodean en el hormiguero y acuden en gran número en torno a cualquier amenaza.

Esos algoritmos inspirados en el mundo natural son tan antiguos como las máquinas de Turing y otros modelos clásicos de la computación, explica Melanie Mitchell, informática de la Universidad estatal de Portland. Pero en el ciberespacio mundial, cada vez más saturado por enormes conjuntos de datos (*Big data*) —cada año se generan cientos de exabits de información (1 exabit = 10^{18} bits)—, puede que los programas basados en la naturaleza representen la mejor forma de afrontar esa carga. «Existe un enorme interés en nuevas colaboraciones entre las ciencias de la vida y la informática, porque se admite ahora que la computación trasciende a los ordenadores», comenta Mitchell. «Una de las principales habilidades de los sistemas biológicos es el reconocimiento de pautas o regularidades. Identifican señales entre el ruido incluso cuando se hallan abarrotados de información. Así actúan los cerebros, las células, las colonias de insectos y el resto de los sistemas biológicos para poder sobrevivir. Nosotros desearíamos que los ordenadores los imitaran».







MEDICINA

Cien pruebas en una

Un diagnóstico poco oneroso alerta de la posible transmisión de enfermedades congénitas *Mary Carmichael*

¿Cuánto pagaríamos por la certeza de que nuestros futuros hijos no van a sufrir enfermedades congénitas incapacitantes o mortales causadas por genes recesivos? La respuesta obvia es «lo que hiciera falta». Las pruebas de cribado permiten ya identificar a los portadores asintomáticos de numerosos genes recesivos defectuosos, que si son heredados por partida doble (un ejemplar de cada progenitor) ocasionan males como la fibrosis quística o la enfermedad de Tay-Sachs. Pero casi nadie se somete a las pruebas para identificar esas variantes, pues resulta demasiado caro: son docenas de ensayos que cuestan cientos de euros cada uno. Las mutaciones peligrosas son infrecuentes, y casi todo el mundo opta por correr el riesgo y confiar en que sus hijos nacerán sanos, proceder que a veces desemboca en tragedia.

Pero ya no ha de ser más así, gracias a un sencillo análisis de saliva realizado por la compañía Counsyl que intenta identificar en el genoma alguno de los más de 100 alelos recesivos responsables de enfermedades. En cierto sentido, se reúne en un solo método muchas de las pruebas que normalmente se realizan por separado; desde el punto de vista médico, el análisis proporciona esencialmente los mismos resultados. Pero lo hace de una sola vez, a un coste de unos 300 euros.

Los análisis tradicionales que buscan las variantes recesivas operan escrutando regiones específicas del genoma que se sabe se hallan asociadas a una enfermedad. En algunos casos, las pruebas secuencian los genes para determinar la presencia de mutaciones. En cambio, la prueba de Counsyl no se basa en la secuenciación, sino que busca polimorfismos de un único nucleótido (SNP, por sus siglas en inglés), pequeñas erratas del genoma en las que una base ha sido reemplazada por otra. Algunos de estos polimorfismos contribuyen a la enfermedad; otros están vinculados a genes que la causan. Debido al reducido tamaño de los SNP, resulta más barato identificar uno de ellos que secuenciar todo un gen o una región de un cromosoma, que puede constar de millones de bases. La compañía afirma que la prueba detecta mutaciones con una sensibilidad y especificidad superiores al 99 por ciento, es decir, raramente ocasiona positivos o negativos falsos.

Hasta ahora la prueba se ha utilizado sobre todo en casos de infertilidad. Pasquale Patrizio, director del Centro de Fertilidad de Yale, es uno de los médicos que la ofrecen (es miembro del equipo asesor de Counsyl). Afirma que resulta eficaz en el tratamiento de parejas que han sufrido repetidos abortos sin una causa conocida. En algunos casos, tales pérdidas se deben a genes recesivos que impiden la llegada a término de la gestación. «Disponer de una prueba de cribado de tan amplio espectro ha supuesto un gran avance», opina Patrizio. Obviamente, muchas personas portadoras de genes recesivos logran concebir sin el auxilio de clínicas de fertilidad. Descubren su defecto genético más tarde, al enfermar sus hijos.

Las parejas que dan positivo en la prueba tienen la oportunidad de planificar con tiempo. Pueden optar por la fecundación in vitro, combinada con un diagnóstico genético previo a la implantación, o bien elegir embriones que no porten genes defectuosos. Sea de una u otra forma, en la población general se reduciría el número de niños con enfermedades genéticas. La mayoría de las afecciones con herencia autosómica recesiva reciben escasa atención en las investigaciones: como son raras, se les dedica pocos fondos. En este momento, la prueba de Counsyl representa el mejor método para reducir el número de personas con esas afecciones.

La técnica presenta varios obstáculos en su camino hacia una más amplia aplicación. Hay quienes temen que facilite la gestación de «bebés de diseño». Argumentan que si se admite un amplio cribado en busca de enfermedades genéticas raras, se dará paso a ensayos para identificar otros rasgos, como la estatura o la inteligencia.

Sin embargo, la prueba no puede dar lugar a niños de diseño, porque se orienta hacia genes individuales, no hacia los conjuntos de genes, plurales y mal comprendidos que intervienen en fenómenos complejos como la inteligencia. «No existe un único gen para el CI o la capacidad musical», afirma Steven Pinker, psicólogo de la Universidad de Harvard, que asesora a la compañía sobre los problemas éticos relativos a la genómica personal. Además, señala, «si algún colectivo hubiera de temer la eugenesia sería el de los judíos». Estos han abrazado el antiguo y oneroso sistema de pruebas sobre genes recesivos, porque los judíos ashkenazi presentan con mayor frecuencia ciertas variantes recesivas mortales. Pinker, que es judío, es portador de la disautonomía, una enfermedad incurable que detiene el crecimiento de las neuronas. Lo descubrió al someterse a la prueba de Counsyl. «Mi esposa también es portadora», revela. «Nos conocimos demasiado tarde para tener hijos pero, de haberlos tenido, habríamos corrido un gran riesgo». Ahora, al menos, otras parejas pueden optar por no hacerlo.

ENERGÍA

Gasóleo a partir de basura

Microorganismos transgénicos que se nutren con desechos y segregan combustibles *Matthew L. Wald*

Las actuales refinerías de petróleo, que producen gasolinas, gasóleos, querosenos y otros compuestos, son enormes instalaciones, repletas de depósitos, torres y tubos de acero. Consumen prodigiosas cantidades de energía, liberan humos tóxicos y su materia prima, el crudo, no es renovable. Pero en un futuro, las factorías podrían presentar un tamaño microscópico y servirse de los desechos hidrocarbonados que nos rodean por doquier: el papel de esta revista, tablas y retazos de maderas de edificación o residuos vegetales de nuestro jardín.

El ardid consiste en transformar las moléculas hidrocarbonadas de esos materiales cotidianos en líquidos a temperatura ambiente, aptos para motores de combustión interna. Los intentos más prometedores se basan en la modificación genética de seres unicelulares para que realicen este proceso en nuestro beneficio. Muchos de estos organismos ya sintetizan hidratos de carbono a partir de materiales existentes en su medio, pero sus elaborados no son aptos para el uso humano. Las algas convierten el dióxido de carbono en ácidos grasos que, una vez refinados, podrían servir de combustible. Pero la extracción de las algas de su medio acuático, así como de los ácidos grasos que contienen, exige tanto esfuerzo que el proceso se aplica solo en productos caros, como los cosméticos.

Sería preferible crear organismos que segregasen directamente los hidratos de carbono. (Las empresas prefieren hablar de «secreciones» que de «excreciones», término más ajustado.) Con organismos secretores, «se puede transformar la biomasa de un material residual en un producto que emane de diminutas factorías químicas», explica Eric Toone, del Departamento de Energía estadounidense, encargado de conceder subvenciones a empresas con ideas novedosas sobre biocombustibles.

Pero la creación de factorías modificadas genéticamente conlleva otras complicaciones. Muchos temen que los organismos transgénicos lleguen al medio, pues resultaría casi imposible impedir fugas de seres unicelulares desde las cubas de producción.

Dichos organismos han de recibir además una fuente de alimentación adecuada. Una opción es aprovechar la luz solar. En septiembre de 2010, Joule Unlimited, una empresa recién nacida en Cambridge, Massachusetts, patentó una bacteria transgénica que creaba ingredientes del gasóleo a partir de luz solar y dióxido de carbono.

Otra posibilidad consiste en utilizar la energía almacenada en los hidratos de carbono, como las celulosas, localizadas en la fracción leñosa de las plantas. Se están estudiando métodos para recuperar esas celulosas y convertirlas en etanol. Aunque este combustible se beneficia de un crédito fiscal, presenta menor densidad energética que la gasolina y no puede aplicarse en grandes cantidades en los vehículos tradicionales.

Los científicos y los ingenieros esperan obtener productos de mayor utilidad. El pasado mes de julio, científicos de LS9, una compañía de San Francisco, afirmaron haber modificado bacterias *E. coli* para que sintetizaran alcanos, un tipo de hidrocarburo idéntico al de muchas moléculas producidas en las refinerías tradicionales. Un par de retoques más en su genoma y puede que no tardemos en llenar el depósito de nuestro vehículo con combustible procedente de desechos.





La importancia del ADN redundante

Las funciones de lo que antaño se consideraba un espacio inútil no dejan de sorprender

Melinda Wenner Moyer

LOS GENES constituyen solo alrededor de un dos por ciento del genoma humano. Durante muchos años se pensaba que el ADN restante correspondía a regiones no codificantes o redundantes (ADN «basura»). Pero a lo largo del pasado decenio se ha ido viendo que este espacio posee una enorme importancia en el código genético, ya que alberga una cornucopia de información, no explorada todavía, responsable de controlar el comportamiento de los genes. Una investigación más minuciosa del ADN redundante podría ofrecer nuevos conocimientos sobre la sutil interacción entre los genes y el ambiente, y desembocar, tal vez, en estrategias totalmente nuevas en la interminable batalla de la medicina contra la enfermedad.

Cada pocos meses surgen nuevos ejemplos sobre la influencia del ADN redundante. En el número de septiembre de *Nature Medicine* se informaba que el neuroblastoma (cáncer infrecuente del sistema nervioso) podría deberse, al menos en parte, a ese ADN. En las personas afectadas, un pequeño fragmento de ARN copiado del ADN redundante desactiva la expresión de un gen inhibidor de ese cáncer. Análogamente, quienes padecen otra forma rara de distrofia muscular poseen entre una y diez copias de una sección de ADN redundante en la extremidad del cuarto cromosoma. Pero este tipo de ADN no solo interviene en dolencias raras: en un artículo de *Nature*, publicado en febrero de 2010, se asociaba una región redundante del noveno cromosoma con un mayor riesgo de cardiopatías.

Es posible que ese ADN, en apariencia inútil, facilite la adaptación de los organismos a medios cambiantes. Científicos de la Universidad de Lovaina informaron, en mayo de 2009, que la actividad génica de un cromosoma de cierta levadura estaba directamente controlada por el número de repeticiones de una cierta sección de ADN. Dado que en esa región del genoma el número de repeticiones cambia con mayor frecuencia que en otras, ello permite al organismo evolucionar con mayor rapidez.

¿Merecerá entonces el ADN «basura» una denominación más justa? No existe unanimidad al respecto. Aunque se conozca la función de ciertas partes de ese ADN, los posibles efectos de las restantes «seguramente resultarán mucho más difíciles de determinar», opina Kevin Verstrepen, coautor del estudio sobre las levaduras. No obstante, con el tiempo tal vez vaya saliendo a la luz el valor que esconden.

PARA SABER MÁS

Visite la página **www.ScientificAmerican.com/dec2010/worldchanging** para ver los vídeos ganadores del concurso de vídeos sobre ideas innovadoras, organizado por Scientific American y SciVee.tv.

MARK HOOPER



FÓSILES CON RESTOS DE VIDA

Al contrario de lo que se pensaba, ciertos componentes orgánicos podrían conservarse en los fósiles durante millones de años

Mary H. Schweitzer

Al examinar detenidamente al microscopio la lámina delgada de un hueso fosilizado, observé incrédula las diminutas esferas rojas dentro del conducto de un vaso sanguíneo que atravesaba el tejido duro de color amarillo pálido. Cada una de las esferas presentaba una zona oscura semejante al núcleo de una célula. En realidad, recordaban a las células sanguíneas de los reptiles, las aves y el resto de vertebrados actuales, a excepción de los mamíferos, cuyos eritrocitos carecen de núcleo. La lámina de hueso procedía de un dinosaurio que el equipo del Museo de las Rocosas en Bozeman, Montana, había desenterrado hacía poco (un *Tyrannosaurus rex* que murió hace unos 67 millones de años). Me costaba aceptar que se tratara de células, ya

El ejemplar de *Tyrannosaurus rex* denominado MOR 555, o «Big Mike», es uno de los dinosaurios de cuyos huesos se ha recuperado materia orgánica.

FOTOGRAFÍA DE DAVID LIITTSCHWAGER

Mary H. Schweitzer se doctoró en biología por la Universidad estatal de Montana en 1995. En la actualidad es profesora asociada en el departamento de ciencias marinas, terrestres y atmosféricas de la Universidad estatal de Carolina del Norte y conservadora asociada del Museo de Ciencias Naturales de Carolina del Norte.



EN SÍNTESIS

La perspectiva tradicional sobre la fosilización sostiene que a lo largo del tiempo todos los componentes orgánicos desaparecen y se conservan solo los restos inertes mineralizados.

Sin embargo, un creciente conjunto de datos indica que, bajo ciertas condiciones, algunas sustancias orgánicas, como restos de sangre, células óseas y garras, pueden perdurar en los fósiles durante millones de años.

Estas sustancias antiguas ayudan a resolver incógnitas como la adaptación de los dinosaurios a unas condiciones ambientales variables y la velocidad de su evolución.

que la materia orgánica era demasiado delicada para resistir un lapso de tiempo tan dilatado.

Durante más de 300 años, los paleontólogos han dado por supuesto que la única información que se puede obtener de los huesos fosilizados es el tamaño y la forma. El conocimiento tradicional sostiene que cuando un animal muere bajo unas condiciones adecuadas de fosilización, los minerales inertes del ambiente circundante terminan por reemplazar a las moléculas orgánicas (las que constituyen las células, los tejidos, los pigmentos y las proteínas) y se forman como resultado huesos compuestos enteramente por materia mineral. Cuando aquella tarde de 1992 contemplaba las estructuras carmesíes de los huesos de dinosaurio, me hallaba de hecho ante una prueba que contradecía ese sólido principio de la paleontología, si bien en aquel momento me quedé totalmente desconcertada. Teniendo en cuenta que los dinosaurios eran vertebrados no mamíferos, los elementos rojos podían corresponder a células sanguíneas con núcleo, pero también podían haberse originado por algún proceso geológico que desconocía.

Hacía poco que había obtenido la licenciatura en la Universidad estatal de Montana y carecía de la experiencia para investigar la microestructura ósea de los dinosaurios. Tras pedir la opinión a los miembros de la facultad y a otros recién licenciados sobre la identidad de las esferas rojas, el enigma llegó a oídos de Jack Horner, conservador de paleontología del Museo de las Rocosas y uno de los mayores expertos en dinosaurios. Horner decidió verlo con sus propios ojos. Durante lo que me parecieron horas, estuvo observando en el microscopio con el ceño fruncido sin decir palabra. Después, mirándome con el gesto torcido, me preguntó, «¿Qué crees que son?» Contesté que no lo sabía, pero por el tamaño, la forma y el color que poseían, y el lugar donde se hallaban, recordaban a células sanguíneas. Suspiró. «Intenta demostrar entonces que no lo son». Aquello supuso un reto irresistible que, todavía hoy, me sirve de referencia para formular mis preguntas ante un problema.

Desde entonces, mi equipo ha recuperado diversos tipos de restos orgánicos (vasos sanguíneos, células óseas y fragmen-

RAÚL MARTÍN/CORTESÍA DE MARY H. SCHWEITZER (*micrografía*)

NUEVO ENFOQUE

Fases de la fosilización

Según la perspectiva clásica del proceso de fosilización de un animal, la piel, los músculos, las vísceras y los tendones se descomponen; solo los huesos permanecen. Las células, las proteínas y los vasos sanguíneos del hueso también se degradan; los espacios que dejan son ocupados por los minerales del sedimento circundante que, a la larga, forman una amalgama compacta con los minerales del hueso original. Pero las células, las proteínas y el tejido blando hallados en varios huesos antiguos indican que la fosilización no siempre ocurre así. Todavía no se sabe exactamente por qué en ocasiones las sustancias orgánicas perduran durante decenas de miles de años, aunque sí se han identificado los factores (*resaltados en rojo*) que ayudan a su conservación y recuperación.



Muerte
El animal muere en algún lugar donde queda a salvo de los carroñeros.

Primer descubrimiento
A diferencia del aspecto típico del hueso fosilizado al microscopio, una de las láminas delgadas de un hueso de *T. rex* examinada por la autora contenía estructuras semejantes a las células sanguíneas.

tos de un material que compone las garras, similar al de las uñas) de diferentes muestras, que indican que si bien la conservación del tejido blando en los fósiles no es algo habitual, tampoco representa un suceso único. Estos hallazgos no solo se alejan de la descripción clásica del proceso de fosilización, sino que también ofrecen una perspectiva novedosa sobre la biología de los animales del pasado. El hueso de otro ejemplar de *T. rex* ha revelado que se trataba de una hembra que se disponía a realizar una puesta cuando falleció, información imposible de deducir a partir de la forma y el tamaño de los huesos. Y una proteína identificada en restos de fibras hallados cerca de un pequeño dinosaurio carnívoro desenterrado en Mongolia ha ayudado a establecer que el dinosaurio en cuestión poseía plumas semejantes, a nivel molecular, a las de las aves actuales.

Nuestros resultados han sido acogidos con gran escepticismo; después de todo, son extremadamente insólitos. Pero el escepticismo constituye una parte intrínseca de la ciencia, por lo que sigo considerando nuestro trabajo fascinante y prometedor. El estudio de las moléculas orgánicas antiguas de dinosaurios permite ahondar en el conocimiento sobre la evolución y la extinción de estos magníficos animales en una manera imposible de imaginar hace tan solo dos decenios.

LOS PRIMEROS INDICIOS

Los científicos ponen todo su empeño en refutar hipótesis elaboradas durante largo tiempo, antes de confirmar la validez de las mismas. Así, durante los últimos 20 años he llevado a cabo experimentos con el objetivo de desmentir la hipótesis de que los elementos descubiertos por mi equipo formaban parte del tejido blando de los dinosaurios y de otros animales ya desaparecidos.

Empecé planteando que si las microestructuras rojas observadas en el hueso del *T. rex* guardaban alguna relación con las células sanguíneas o constituyentes de las mismas (moléculas de hemoglobina o grupos hemo aglutinados tras ser liberados por las células antes de morir), solo habrían podido persistir, probablemente en un estado muy alterado, si los hue-



sos se hubiesen conservado de forma excepcional. Esta hipótesis parecía confirmarse a nivel macroscópico. El esqueleto de *T. rex* es un ejemplar completo procedente del este de Montana (oficialmente nombrado MOR 555 y apodado «Big Mike»), compuesto por numerosos huesos en buen estado. El examen microscópico de las láminas delgadas de los huesos de las extremidades confirmó asimismo una conservación inusual. La mayoría de los conductos de los vasos sanguíneos del hueso compacto estaban vacíos, es decir, carecían de los depósitos minerales que suelen formarse en los fósiles de dinosaurios. Además, estas microscópicas estructuras de color rubí aparecían solo en los conductos, nunca en el hueso circundante o en los sedimentos adyacentes a los huesos, justo como cabría esperar si se tratara de células sanguíneas.

A continuación, centré mi atención en la composición química de esas estructuras. Los análisis demostraban su riqueza en hierro, característica propia de los glóbulos rojos. Su composición difería asimismo de la del hueso circundante y de los sedimentos que enterraban al dinosaurio. Pero para averiguar la relación entre los elementos rojos y las células sanguíneas, examiné si las muestras presentaban grupos hemo, las moléculas portadoras de hierro que proporcionan el tono escarlata a la sangre de los vertebrados y que permiten a la hemoglobina transportar oxígeno desde los pulmones al resto del cuerpo. Cuando es estimulado mediante láseres, el grupo hemo vibra según un patrón característico y, debido a que contiene un núcleo metálico, absorbe la luz de un modo específico. El análisis espectroscópico de las muestras (método que mide la luz emitida, absorbida o dispersada por un material) indicaba la presencia de compuestos que podían corresponderse con grupos hemo.

Uno de los experimentos más convincentes que llevamos a cabo se basaba en la respuesta inmunitaria. Cuando el cuerpo detecta una sustancia extraña potencialmente dañina produce anticuerpos, proteínas que reconocen o se unen a la misma para proteger al organismo. En nuestro experimento, inyectamos extractos del hueso de dinosaurio en un ratón, lo que provocó en él la formación de anticuerpos contra los compuestos orgánicos del extracto. Cuando luego expusimos esos anticuerpos a la hemoglobina de pavos y ratas, se unieron a esta. Ello demostraba que el extracto del hueso de dinosaurio presentaba hemoglobina o alguna sustancia muy similar a ella.

Ninguna de las numerosas pruebas químicas e inmunológicas que realizamos contradijo la hipótesis de que las misteriosas estructuras rojas visibles al microscopio fuesen glóbulos rojos de *T. rex*. Sin embargo, no pudimos demostrar que la sustancia parecida a la hemoglobina perteneciese a esas estructuras, ya que las técnicas disponibles carecían de suficiente resolución. No podíamos asegurar, por tanto, que se tratara de células sanguíneas. Cuando en 1997 publicamos nuestros hallazgos, expusimos las conclusiones con cautela, a saber, que la hemoglobina podía haber resistido el paso del tiempo y que su origen más probable serían las células del dinosaurio. El artículo tuvo una escasa repercusión.

CADA VEZ MÁS PRUEBAS

A lo largo del estudio de *T. rex*, me di cuenta de la valiosa información que podían ofrecer los compuestos orgánicos fósiles sobre los animales extintos. Si se consiguiera extraer proteínas de los fósiles, se podría descifrar la secuencia de sus aminoácidos de modo similar a como se realiza la secuenciación del ADN. Las secuencias de las proteínas, igual que las del ADN, aportan datos sobre las relaciones evolutivas entre los animales, los cambios de las especies a lo largo del tiempo y la aparición de nuevos caracteres que habrían conferido una ventaja a los animales que los poseyeran. Pero primero debía demostrar la existencia de proteínas antiguas en otros fósiles distintos de los del *T. rex* que había estudiado hasta entonces. Junto con Mark Marshall, por entonces en la Universidad de Indiana, y Seth Pincus y John Watt, en ese momento en la Universidad de Montana, centramos nuestra atención en dos fósiles bien conservados que prometían contener compuestos orgánicos.

Los compuestos orgánicos fósiles podían ofrecer una valiosa información sobre los animales extintos

El primero pertenecía a una formidable ave primitiva, *Rahonavis,* que los paleontólogos de la Universidad de Stony Brook y del Macalester College habían desenterrado de depósitos de Madagascar datados del Cretácico superior, hace entre unos 80 y 70 millones de años. Durante la excavación se habían percatado de la presencia de un material blanco y fibroso en los huesos del esqueleto del pie. El material no parecía hallarse en ningún otro hueso de la cantera ni en los sedimentos del depósito, lo que sugería que formaba parte del animal y no se había acumulado secundariamente sobre el fósil. Solicitaron mi ayuda para averiguar si correspondía a la dura funda proteínica compuesta por queratina que rodea los huesos de las garras de las aves actuales.

Las proteínas del grupo de la queratina presentan buenas posibilidades de conservarse después de largo tiempo, debido a su abundancia en los vertebrados y su resistencia a la degradación (característica ventajosa en órganos expuestos a la intemperie, como la piel). Estas proteínas son principalmente de dos tipos: alfa y beta. Todos los vertebrados poseen queratina alfa, que en los humanos forma parte del pelo y las uñas y ayuda a la piel a resistir la abrasión y la deshidratación. La queratina beta está ausente en los mamíferos y, entre los organismos actuales, se encuentra solo en las aves y los reptiles.

Para identificar queratinas en el material blanquecino de los huesos del pie del *Rahonavis* empleamos muchas de las técnicas aplicadas en el estudio del *T. rex*. Para nuestra sorpresa, las pruebas de anticuerpos indicaban la presencia de ambos tipos de queratina. Aplicamos asimismo técnicas de diagnóstico adicionales que permitieron detectar aminoácidos en la cubierta del hueso del pie, y también nitrógeno (un componente de los aminoácidos) unido a otros compuestos. Los resultados apoyaban la idea de que el enigmático material blanquecino incluía partes de queratina alfa y beta, y constituía el resto de lo que una vez fueron sus garras.

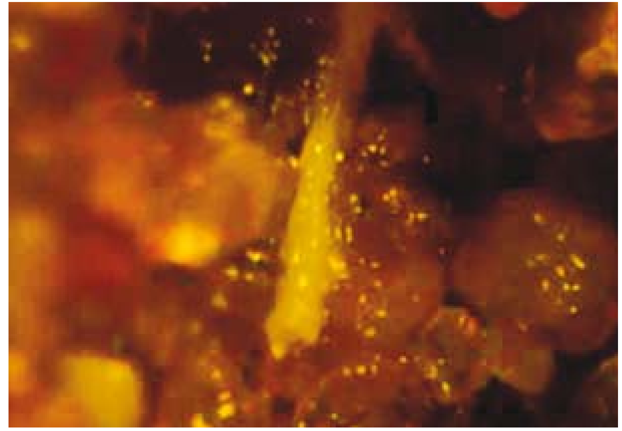
El segundo ejemplar que estudiamos era un fósil espectacular del Cretácico superior que había sido descubierto en Mongolia por investigadores del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Aunque los científicos nombraron al animal *Shuvuuia deserti*, o «ave del desierto», en realidad se trataba de un pequeño dinosaurio carnívoro. Durante la limpieza del fósil observamos pequeñas fibras blancas en la región del cuello que recordaban a plumas. Las aves son descendientes de los dinosaurios. Los «cazadores de fósiles» han descubierto varios ejemplares de dinosaurio que conservan impresiones de plumas. Por tanto, la teoría de que *Shuvuuia* presentase un plumaje aterciopelado resultaba verosímil. Sin em-

Restos antiguos orgánicos

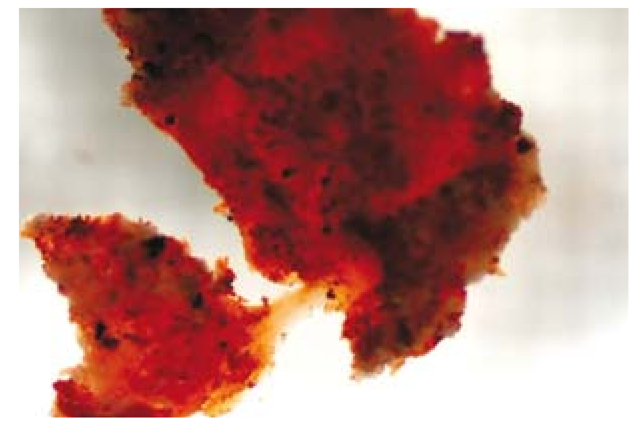
Se han recuperado restos de tejido blando de varios fósiles que se remontan a decenas de millones de años.



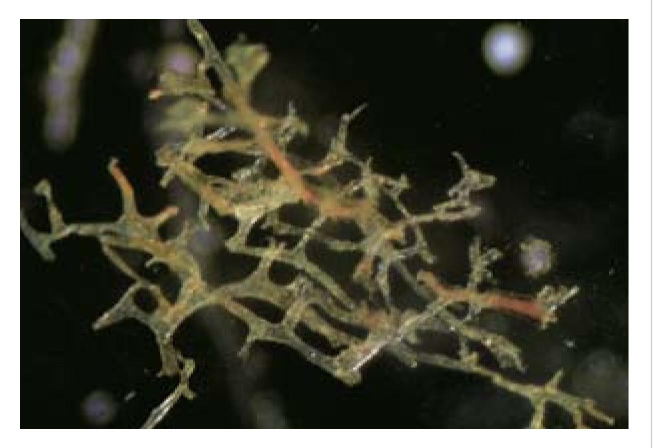
El hueso del pie del ave *Rahonavis ostromi*, que vivió hace entre 80 y 70 millones de años en Madagascar, contenía un material blanco que podría ser el resto de una cubierta proteínica de las garras del animal.



Filamento hueco (*centro*) parecido a la caña de una pluma. Pertenecía a *Shuvuuia deserti*, un pequeño dinosaurio carnívoro que habitó en Mongolia hace entre unos 83 y 70 millones de años.



Hueso medular (un tejido especial que aparece durante un breve lapso de tiempo cuando el cuerpo de las hembras se prepara para la puesta) identificado en un fósil de *T. rex* de 68 millones de años de antigüedad, descubierto en Montana.



Las células sanguíneas —o sus semejantes— aparecieron al disolver los minerales de los fragmentos de un tipo de hueso muy frecuente, el hueso cortical, en el *T. rex* de Montana.

CORTESÍA DE MARYLOU STEWART, UNIVERSIDAD DE STONY BROOK (*hueso del pie*); CORTESÍA DE MARY H. SCHWEITZER (*filamento hueco y células sanguíneas*); DE «SOFT-TISSUE VESSELS AND CELLULAR PRESERVATION IN *TYRANNOSAURUS REX*», POR MARY H. SCHWEITZER ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 307; 25 DE MARZO DE 2005 (*hueso medular*)

bargo, no me imaginaba que una estructura tan frágil pudiera resistir los estragos del tiempo. Más bien sospechaba que esas fibras blancas pertenecían a plantas actuales o a hongos.

Para mi sorpresa, las pruebas iniciales descartaron el origen vegetal o fúngico de las fibras. Además, los análisis posteriores de la microestructura de los extraños filamentos blancos señalaban la existencia de queratina. Las alas de las aves adultas actuales se componen casi exclusivamente de queratina beta. Si las fibras identificadas en *Shuvuuia* guardaban alguna relación con las plumas, deberían contener solo queratina beta, a diferencia de la funda de la garra del *Rahonavi*s, que contenía ambos tipos de la proteína. Y fue lo que en realidad descubrimos cuando llevamos a cabo las pruebas de anticuerpos, cuyos resultados publicamos en 1999.

HALLAZGOS EXTRAORDINARIOS

Estaba convencida entonces de la posible conservación de pequeños fragmentos de proteínas en fósiles que se mantuvieran en muy buen estado. Contábamos además con las herramientas necesarias para identificarlas. Sin embargo, numerosos miembros de la comunidad científica seguían mostrándose escépticos. Nuestros hallazgos ponían en entredicho el conocimiento sobre la descomposición de las células y de las moléculas. Los estudios in vitro con moléculas orgánicas indicaban que las proteínas no deberían perdurar más de un millón de años y que el ADN poseía una vida aún más corta. Aunque se había descrito la recuperación de ADN de millones de años de antigüedad, los trabajos posteriores no lograron validar esos resultados. Los únicos datos ampliamente aceptados correspondían a moléculas de no más de varias decenas de miles de años. De hecho, uno de los revisores anónimos de un artículo que pretendía publicar me dijo que tal conservación no era posible y que, fueran cuales fueran nuestros datos, no podría convencerle de lo contrario.

Ante semejante reticencia, un colega me aconsejó que retrocediera un paso y demostrase primero la eficacia de nuestra me-

todología. Debía proporcionar una prueba de partida mediante la identificación de proteínas en huesos no tan antiguos como los de dinosaurio. Junto con el químico analítico John Asara, de la Universidad de Harvard, obtuvimos proteínas de fósiles de mamut de entre 300.000 y 600.000 años de edad. La secuenciación de las proteínas mediante espectrometría de masas las identificó unívocamente como colágeno, componente clave del hueso, los tendones, la piel y otros tejidos. Sin embargo, la publicación en 2002 de nuestros resultados sobre el mamut fue ignorada por la mayor parte de la comunidad científica. Pero la prueba de partida definitiva no se hizo esperar.

Al año siguiente, un equipo del Museo de las Rocosas finalizó la excavación de otro esqueleto de *T. rex* (llamado MOR 1125 y apodado «Brex» por su descubridor Bob Harmon), a día de hoy el más antiguo encontrado, con una edad de 68 millones de años. Al igual que el otro *T. rex* más reciente, fue descubierto en la Formación Hell Creek en el este de Montana. A causa de la controversia que habían despertado mis primeros estudios sobre el *T. rex*, este nuevo ejemplar de dinosaurio representaba la oportunidad perfecta para repetir los análisis y confirmar mis resultados.

Al examinar un fragmento de fémur, observé que su superficie interna se hallaba cubierta por una capa de un tipo de hueso que no se había descrito antes en dinosaurios. Era una capa muy fibrosa, con abundantes conductos de vasos sanguíneos y un color y textura totalmente distintos de los del hueso cortical, principal constituyente del esqueleto. Me di cuenta de que se trataba de una hembra que se preparaba para realizar una puesta. Había estudiado la fisiología de las aves y estaba casi segura de que esta peculiar estructura correspondía a hueso medular, un tejido especial que aparece durante un breve lapso de tiempo (a menudo solo durante dos semanas) cuando las aves realizan la puesta y cuya función es proporcionar una fuente rápida de calcio para fortalecer la cáscara de los huevos.

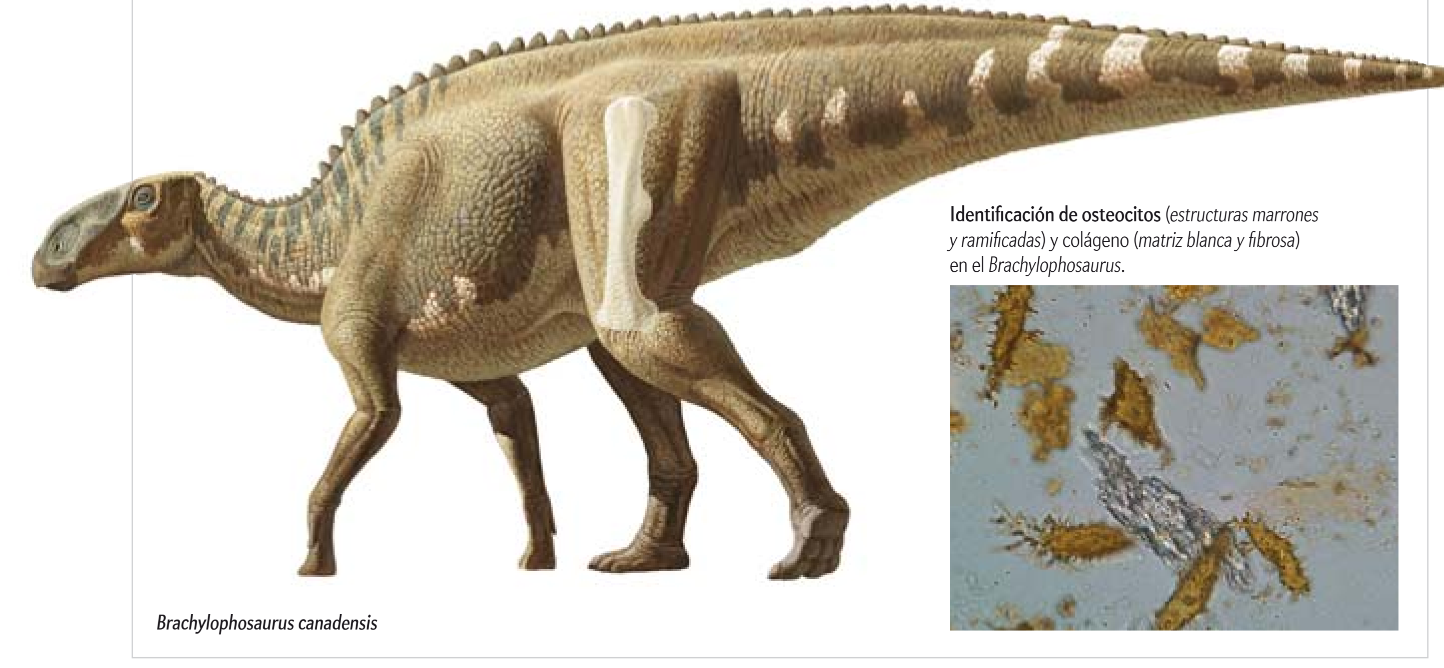
Una de las características que distingue al hueso medular de otros tipos de hueso es la orientación aleatoria de sus fibras de colágeno, rasgo que responde a su rápido crecimiento. (Cuando sufrimos una fractura, el hueso que se forma primero presenta la misma organización, y debido a ello percibimos un abultamiento.) Para observar la organización distintiva de las fibras de colágeno, intentamos desmineralizar los huesos mediante ácidos débiles. Si se trataba de hueso medular con colágeno, obtendríamos fibras orientadas aleatoriamente. Repetimos el experimento varias veces. En todas ellas quedaba un material fibroso elástico, como sucede en las aves cuando el hueso medular se somete a este proceso.

Es más, cuando posteriormente disolvimos fragmentos del hueso cortical, más abundante y denso, obtuvimos más tejido blando. Al destruir la matriz, aparecieron tubos huecos, flexibles, transparentes y ramificados, con un aspecto idéntico al

UN CASO PRÁCTICO

Disección de un pico de pato

En 2007, durante las excavaciones en el este de Montana, se recuperó un fémur bien conservado de *Brachylophosaurus canadensis*, un dinosaurio de pico de pato. La microscopía puso de manifiesto unas estructuras que se asemejaban a los osteocitos, células que se hallaban dentro de una matriz de material blanco y fibroso similar al colágeno (*micrografía*). Las pruebas posteriores confirmaron la presencia de tejidos blandos y descartaron la idea de que las estructuras parecidas al colágeno y a los osteocitos se derivaran de la actividad bacteriana: los extractos obtenidos de los huesos de dinosaurio reaccionaban con anticuerpos específicos del colágeno y de otras proteínas que las bacterias no sintetizaban. Y, como cabría esperar si el hueso albergaba proteínas de dinosaurio, las secuencias obtenidas mediante espectrometría de masas (que identifica las secuencias de aminoácidos en las proteínas) eran muy similares a las obtenidas de aves actuales, descendientes de los dinosaurios, y diferentes a las de las bacterias.



Identificación de osteocitos (*estructuras marrones y ramificadas*) y colágeno (*matriz blanca y fibrosa*) en el *Brachylophosaurus*.

Brachylophosaurus canadensis

RAÚL MARTÍN (*dinosaurio*); CORTESÍA DE MARY H. SCHWEITZER (*micrografía*)

de los vasos sanguíneos. Flotando en el interior de esos vasos se apreciaban estructuras rojas y redondas, y acumulaciones amorfas de material rojo. Otros experimentos de desmineralización pusieron de manifiesto la presencia de osteocitos, células óseas que segregan colágeno y otros componentes de la parte orgánica del hueso. El nuevo ejemplar de *T.rex* parecía conservar elementos nunca antes vistos en los huesos de los dinosaurios.

Cuando en 2005 describimos en la revista *Science* la identificación de lo que parecía colágeno, vasos sanguíneos y células óseas, el artículo cosechó mucha atención, si bien la comunidad científica adoptó una actitud de cautela. En el artículo solo afirmábamos la semejanza de los elementos hallados en el fósil con los de los huesos actuales, no su coincidencia. Después de millones de años enterrados en sedimentos y expuestos a distintas condiciones geoquímicas, los fósiles probablemente compartían escasas características químicas con los huesos del dinosaurio en vida. Para comprobar el valor real de los elementos descritos, debíamos establecer su composición.

Con las técnicas que habíamos puesto a punto en el estudio de Big Mike, el *Rahonavis,* el *Shuvuuia* y el mamut, empecé a analizar en profundidad el hueso del segundo *T. rex*. Conté con la colaboración de Asara, quien había perfeccionado los métodos de purificación y secuenciación empleados en el estudio del mamut y se hallaba preparado para secuenciar las proteínas del dinosaurio, mucho más antiguas. Esta vez la tarea resultó más ardua, porque la concentración de moléculas orgánicas en el dinosaurio era varios órdenes de magnitud inferior a la del mamut (cuyos restos eran más recientes), y porque las proteínas estaban muy degradadas. Sin embargo, finalmente conseguimos secuenciarlas. Y, para nuestra satisfacción, cuando Chris Organ, de la Universidad de Harvard, comparó las secuencias de *T. rex* con las de otros organismos, observó que se agrupaban en la proximidad de las aves y luego de los cocodrilos, los dos grupos de parientes vivos más cercanos de los dinosaurios.

LA POLÉMICA Y SU REPERCUSIÓN

Los artículos en que detallábamos el proceso de secuenciación, publicados en 2007 y 2008, generaron una encendida controversia, gran parte de ella centrada en nuestra interpretación de los datos obtenidos con la espectrometría de masas. Algunos de los críticos aducían que no disponíamos de suficientes secuencias para apoyar nuestras conclusiones, mientras otros argumentaban que las estructuras que interpretábamos como tejidos blandos primigenios eran en realidad una biopelícula, un limo producido por microorganismos cuando colonizan el hueso fosilizado. Hubo también otras críticas. Mis sentimientos eran contradictorios al respecto. Por un lado, los científicos debemos demostrar escepticismo y examinar con rigor nuestras afirmaciones. Por otro, la ciencia funciona según el principio de parsimonia, que considera como correcta la explicación más sencilla para el conjunto de los datos. Y nosotros habíamos respaldado nuestra hipótesis con multitud de argumentos.

De todos modos, sabía que un único descubrimiento carece de trascendencia científica a largo plazo. Teníamos que secuenciar proteínas a partir de otros hallazgos de dinosaurios. Cuando durante una expedición estival hallamos los huesos de *Brachylophosaurus canadensis*, un dinosaurio herbívoro de pico de pato de 80 millones de años de antigüedad, sospechamos enseguida que nos proporcionaría proteínas antiguas. Hicimos todo lo posible para liberarlo de la arenisca que lo rodeaba, al tiempo que minimizábamos su exposición a los elementos. La contaminación aérea, las variaciones de humedad y otros factores ambientales podrían dañar las frágiles moléculas, de modo que debíamos actuar con prontitud.

El fósil correspondía a una hembra que se preparaba para realizar una puesta

Gracias, quizás, a esta intervención cuidadosa (y al análisis inmediato), las características químicas y morfológicas de este dinosaurio sufrieron una alteración menor que las de Brex. Como habíamos esperado, dentro del hueso del animal hallamos células englobadas en una matriz de fibras blancas de colágeno. Las células mostraban prolongaciones delgadas y largas similares a las ramificaciones de los osteocitos; podían observarse desde el cuerpo celular hasta su conexión con otras células. Algunas de las células parecían contar incluso con estructuras internas, entre ellas, posibles núcleos.

Comprobamos que los extractos del hueso del pico de pato reaccionaban con anticuerpos específicos del colágeno y de otras proteínas que las bacterias no sintetizaban; se rebatía así la idea de que nuestros tejidos blandos fuesen meramente biopelículas. Además, las secuencias de proteínas que obtuvimos del hueso estaban más estrechamente emparentadas con las de las aves modernas, al igual que ocurría con las de Brex. Los resultados fueron corroborados por distintos laboratorios que habían realizado análisis independientes de las muestras. En 2009, tras presentar estos hallazgos en *Science*, no escuché ninguna réplica.

Nuestro trabajo no acaba aquí. Todavía hay numerosos aspectos que no comprendemos sobre los tejidos blandos antiguos. ¿Por qué se conservan estas sustancias cuando todos nuestros modelos predicen que deberían degradarse? ¿Cómo se produce realmente la fosilización? ¿Cuánto podemos saber de los animales a partir de fragmentos conservados de moléculas? La secuenciación de este material podría con el tiempo ayudar a clarificar las relaciones de parentesco entre las especies fósiles. Mientras tanto, nuestro equipo y otros vamos añadiendo datos a la colección de secuencias de especies antiguas y actuales. Estas colecciones servirán para realizar estudios comparativos entre secuencias y conocer la evolución de los miembros de un linaje a nivel molecular. Tal información nos ayudará a averiguar el comportamiento de los dinosaurios y otros animales extintos frente a cambios globales en el ambiente, su recuperación tras eventos catastróficos y, en última instancia, el motivo de su extinción.

PARA SABER MÁS

Preservation of biomolecules in cancellous bone of *Tyrannosaurus rex*. Mary H. Schweitzer et al. en *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 17, n.º 2, págs. 349-359, junio de 1997.

Beta-keratin specific immunological reactivity in feather-like structures of the cretaceous alvarezsaurid, *Shuvuuia deserti*. Mary H. Schweitzer et al. en *Journal of Experimental Zoology*, vol. 285, págs. 146-157, agosto de 1999.

Protein sequences from mastodon and *Tyrannosaurus rex* revealed by mass spectrometry. John M. Asara et al. en *Science*, vol. 316, págs. 280-285, 13 de abril de 2007.

Dinosaurian soft tissues interpreted as bacterial biofilms. Thomas G. Kaye et al. en *PLoS ONE*, vol. 3, n.º 7, julio de 2008.

Biomolecular characterization and protein sequences of the campanian hadrosaur *B. canadensis*. Mary H. Schweitzer et al. en *Science*, vol. 324, págs. 626-631, 1 de mayo de 2009.

BIOLOGÍA

Vida invisible

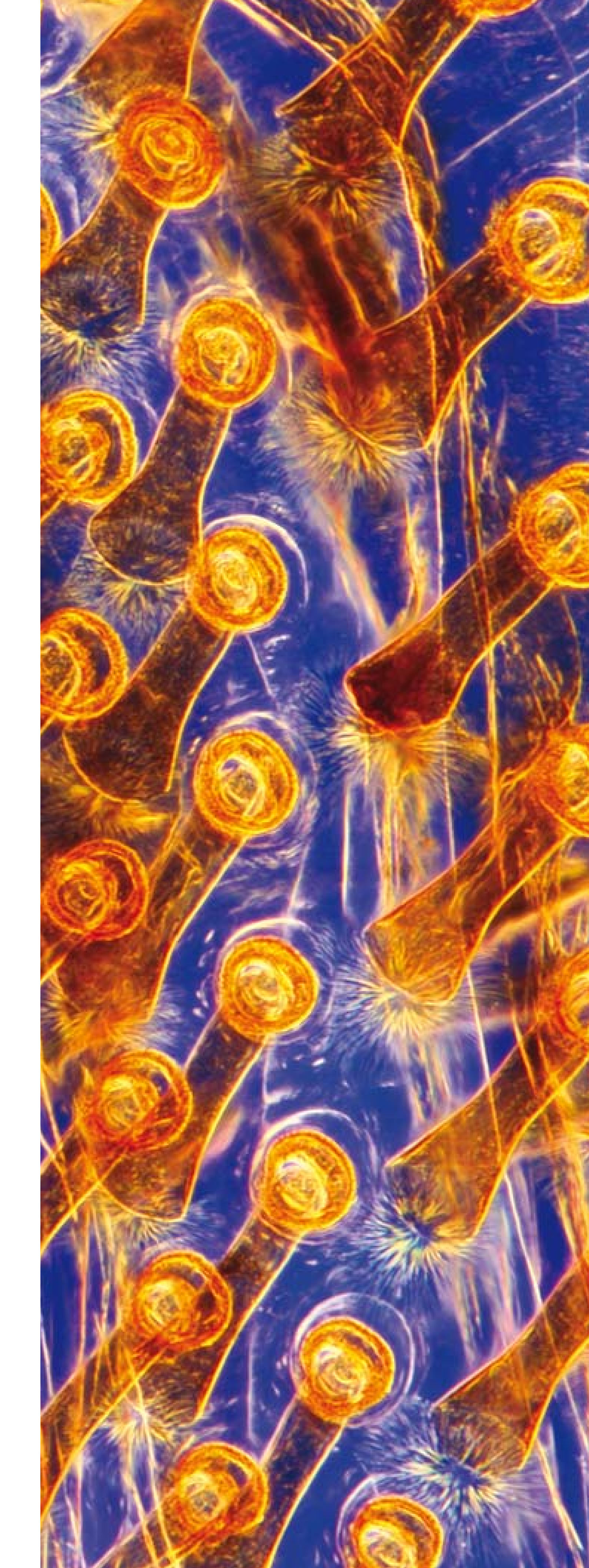
Los paisajes microscópicos muestran una diversidad de formas sorprendente

Davide Castelvecchi

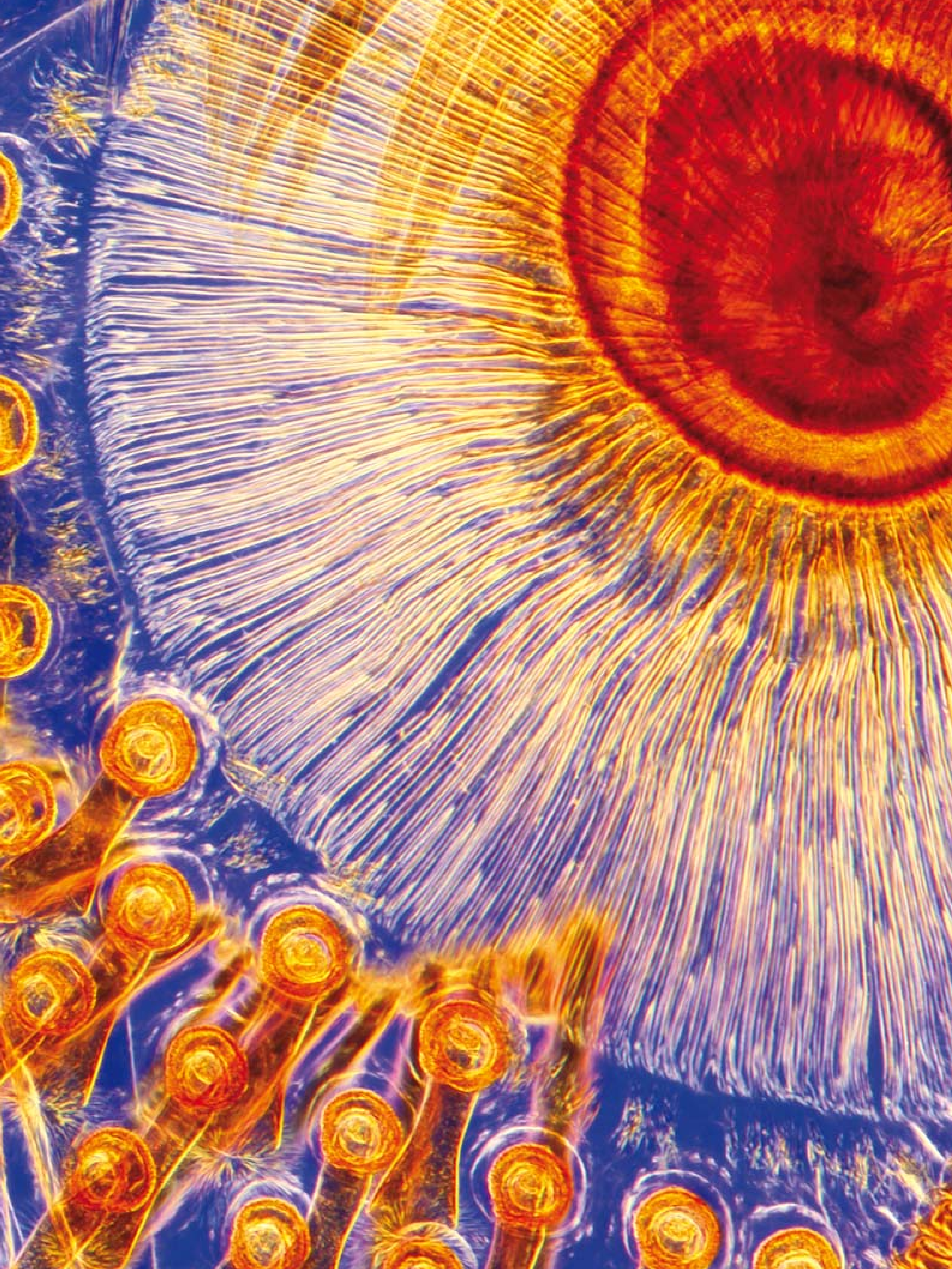
La naturaleza presenta múltiples aspectos que varían según la escala con la que se observe. Esta diversidad resulta especialmente sorprendente en el mundo de la biología, en el que la materia adopta un sinfín de configuraciones. Con la ayuda de instrumentos científicos, se revelan ante nuestros ojos las perspectivas ilimitadas de la naturaleza.

Podemos así hallar belleza en lugares insospechados: en la flor de una mala hierba, en los detalles anatómicos de una pulga o en el hongo que crece sobre un árbol muerto. Algunas personas exploran los mundos microscópicos por razones científicas; otras, por pura aventura, para descubrir formas que resultan invisibles para la mayoría de los humanos.

Afortunadamente, a esos fotógrafos les complace, además, mostrar algunas de sus instantáneas. Cada año, científicos y aficionados envían su arte microscópico al concurso de imágenes digitales de biopaisajes organizado por Olympus (Olympus BioScapes International Digital Imgaging Competition). La finalidad de las fotografías es captar la esencia combinada de la ciencia y el arte. En Investigación y Ciencia nos satisface compartir cada año con nuestros lectores algunas de las instantáneas favoritas de dicho concurso. Esperamos que las disfruten.



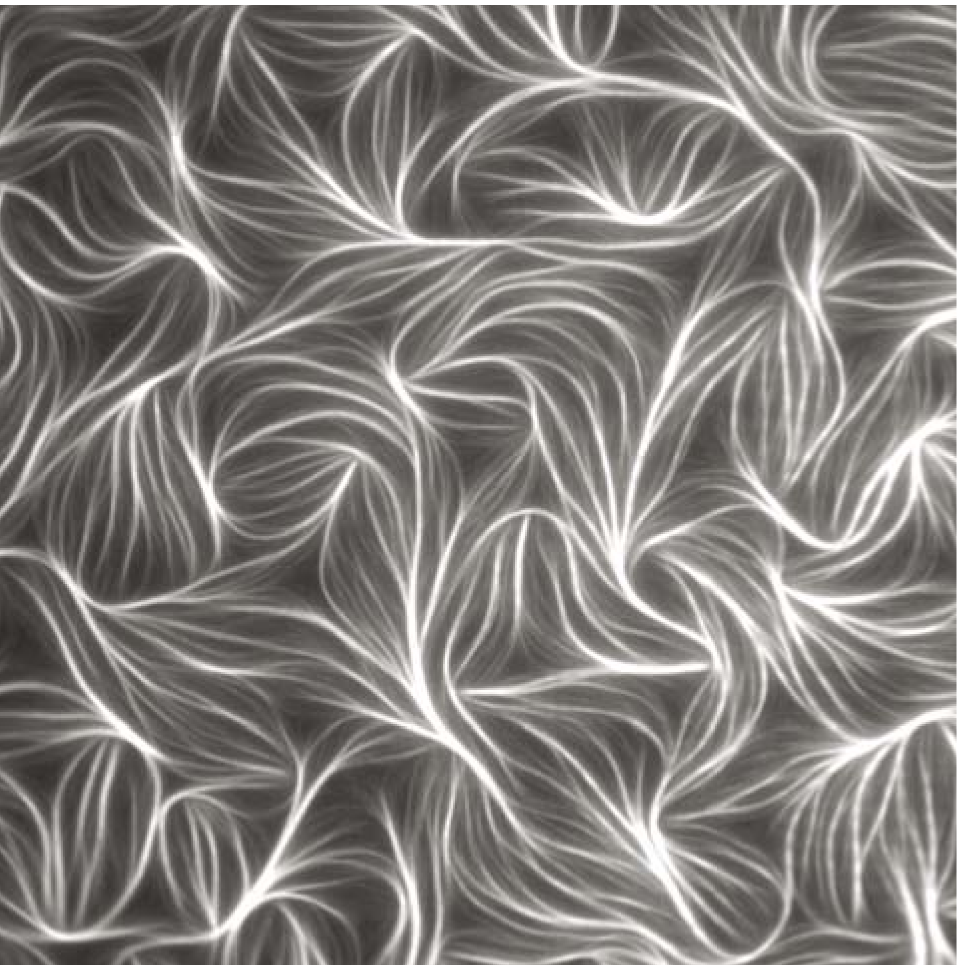
Pata de escarabajo. Spike Walker, profesor de biología retirado que vive en Penkridge, Inglaterra, se esforzaba por conseguir una abstracción visual cuando captó un detalle de la pata anterior de un escarabajo acuático del género *Dytiscus*. Walker empleó un tipo de microscopía de campo oscuro en la que el objeto se fotografía sobre una pantalla azul. La luz azul brilla a través del color naranja del exoesqueleto de la pata. La imagen, que presenta unos 1,8 milímetros de ancho, muestra pelos (*izquierda y abajo*) y una ventosa de succión (*disco grande a la derecha*). Los machos emplean estas ventosas para adherirse a las hembras durante la cópula. La imagen se ha obtenido a partir de la combinación de 44 fotografías, cada una de ellas con un plano focal distinto.



Estambres de hierba. La ortiga muerta menor (*Lamium amplexicaule*) es una mala hierba común. Edwin K. Lee, microbiólogo retirado, recolectó un ejemplar al borde del camino cerca de su casa en Carrollton, Texas, para averiguar si ofrecía algún aspecto interesante en su microscopio. Arrancó los estambres de las flores y los fotografió (*derecha*). Utilizó luz polarizada para resaltar los colores de las anteras, las cabezuelas portadoras del polen. El conjunto de los estambres mide unos 3 mi límetros de ancho.

Larva de mosca negra. Fabrice Parais, hidrobiólogo de la Dirección Regional de Medio Ambiente, Planificación del Territorio y Vivienda, de Francia, comenta que en tan solo un metro cuadrado de un cauce fluvial de Normandía se aprecian a veces decenas de miles de minúsculos animales semejantes a pólipos. Se fijan a las piedras o plantas acuáticas y extienden sus tentáculos (o «abanicos cefálicos») para capturar partículas alimenticias. En realidad no son pólipos, sino insectos: larvas de simúlidos, moscas negras que se alimentan de sangre. Parais cataloga y desarrolla métodos para analizar especímenes como el de abajo (que conservó en formaldehído y fotografió mediante microscopía de campo oscuro). Los datos resultan útiles para el estudio de la biodiversidad y la identificación de posibles señales de presión sobre el ecosistema. Cada tentáculo mide unos 2 milímetros de longitud.

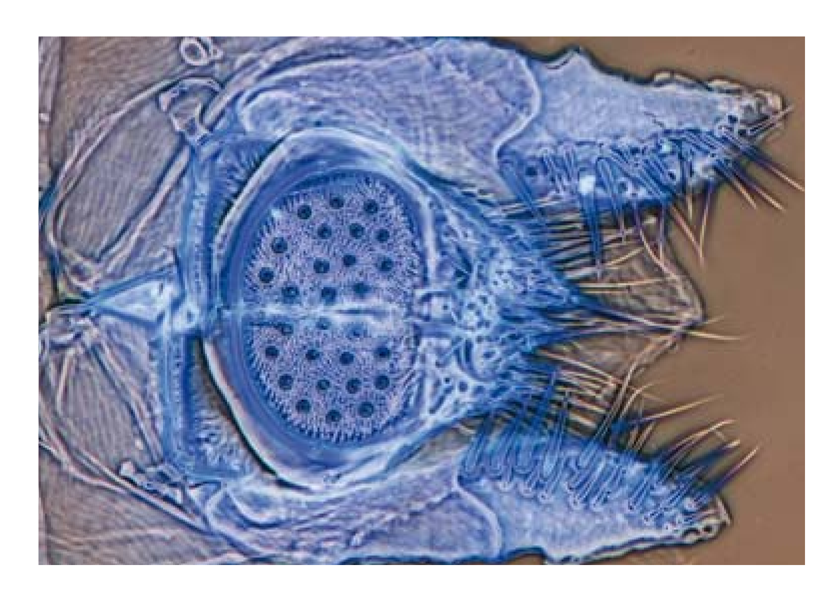




Ojos de araña. El primer premio del concurso se otorgó a Igor Siwanowicz, del Instituto Max Planck de Neurobiología, cerca de Múnich, por la fotografía de los ojos de un segador (*Phalangium opilio, arriba*) obtenida con un microscopio confocal. La imagen de falso color muestra una sección de los ojos de este opilión. Los cristalinos (*los dos óvalos grandes*) se hallan separados entre sí un milímetro; las retinas, formadas por una sola capa de células receptoras parecidas a bastoncillos, confieren a este arácnido una visión monocromática bastante deficiente. Los núcleos de los fotorreceptores aparecen aquí de color cian; los somas celulares alargados se presentan en toda una gama de colores, desde púrpura a rojizo.

Filamentos de actina. Las células con núcleo presentan citoesqueleto, una suerte de andamiaje interno en parte constituido por filamentos de la proteína actina. La imagen de la izquierda muestra filamentos de actina purificada (de unas decenas de micras de longitud), que Dennis Breitsprecher hizo crecer en una placa cuando era estudiante de bioquímica en la Universidad de Medicina de Hannover. Se han descubierto cientos de enzimas que regulan la forma cambiante del citoesqueleto, pero solo una selección adecuada de enzimas produce las formas ondulantes que se observan aquí. Breitsprecher conoce las proteínas que se deben introducir para producir una bella imagen.

Órgano de pulga. Las preparaciones de microscopía clásicas (especialmente las de la era victoriana) son objetos de coleccionista que los aficionados compran en línea o en tiendas especializadas. David Walker, químico retirado de Huddersfield, Inglaterra, obtuvo el detalle de la derecha de un ejemplar de pulga (que muestra un sensilio, órgano sensorial de 0,7 milímetros de longitud) al enfocar su lente sobre una preparación de finales del siglo XIX o principios del XX que compró en eBay por unos 15 dólares. Walker alteró los colores con programas de retoque de fotografías.



Armilaria de color de miel. Con formas que recuerdan los sensuales pliegues de algunos de los cuadros de Georgia O'Keefe, la parte inferior del sombrero de este hongo (*imagen central*) la fotografió Neil Egan, de Cleveland. Las armilarias color de miel son comunes cerca del lugar donde trabaja (una fábrica de acabados de automóviles). El hongo crecía sobre el tocón de un árbol muerto. Egan comenta que buscar la belleza en objetos ordinarios no es algo nuevo para él: «Cuánto más observas las cosas, más interesantes se tornan».



Ala de polilla. Solemos considerar las polillas como insectos nocturnos de color grisáceo y aspecto aburrido. Pero la polilla del ocaso de Madagascar, *Chrysiridia rhipheus*, es una mariposa diurna con hermosas alas iridiscentes. Las escamas de las alas (*abajo*) poseen múltiples capas de cutícula separadas por espacios de diferente grosor (del orden de nanómetros), lo que origina colores por interferencia óptica. Laurie Knight, un programador de páginas web de Tonbridge, Inglaterra, hizo numerosas fotografías de 20 aumentos de dichas escamas. Después empleó un programa especial en su ordenador, que había manipulado para que funcionara a mayor velocidad, para fusionar las imágenes en una sola.



Coral fungiforme. Los corales que la mayoría conocemos representan colonias de pequeños pólipos que producen ramificaciones de carbonato cálcico. Pero los corales fungiformes como el de la página opuesta son solitarios. James Nicholson, especialista en imaginología médica retirado, fotografió el ejemplar vivo, de 5 centímetros de ancho, de una especie no identificada. Nicholson trabaja como asesor no remunerado para el Centro de Cultivo de Coral e Investigaciones Relacionadas, un laboratorio de Charleston, Carolina del Sur. Él y sus colaboradores desean estudiar la agresión ambiental que provocan los vertidos de petróleo o el aumento de la temperatura. Las pequeñas prominencias son tentáculos que el animal utiliza para transportar el alimento a su boca, que es la hendidura de color más claro en el centro.



PARA SABER MÁS

Para más información acerca del concurso de imágenes digitales de biopaisajes organizado por Olympus, visite **www.olympusbioscapes.com**





Tim Berners-Lee fue el creador de la Red, o World Wide Web (WWW). Actualmente dirige el Consorcio de la Red (W3C), radicado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es profesor de ingeniería en el referido instituto y de electrónica y ciencias de la computación en la Universidad de Southampton.

INTERNET

LARGA VIDA A LA RED

La Red resulta crucial para la revolución digital, pero también para mantener la prosperidad y la libertad de nuestra sociedad

Tim Berners-Lee

La red informática de ámbito mundial (World Wide Web, abreviada WWW o W3), nació en mi mesa de trabajo del CERN (Organización Europea de Investigación Nuclear), en Ginebra, en diciembre de 1990. Se componía solo de un sitio web y un navegador, ambos localizados en el mismo computador. Y con un montaje tan sencillo se introducía un profundo concepto: la posibilidad de compartir información entre dos personas cualesquiera del planeta. En alas de este principio, la Red creció velozmente desde sus raíces. Al día de hoy, en su vigésimo aniversario, se halla integrada en nuestro quehacer cotidiano y se cuenta con ella en cualquier momento, como la electricidad.

La Red se ha convertido en un poderoso y ubicuo instrumento por asentarse sobre principios igualitarios, y porque miles de individuos, universidades y sociedades comerciales pertenecientes al Consorcio de la Red (W3C) se han esforzado en ampliar sus posibilidades a partir de tales fundamentos.

La Red que hoy conocemos, sin embargo, sufre diversas amenazas. Algunos de sus participantes con más éxito han empezado a erosionar sus postulados. Hay grandes sitios de redes sociales que están aislando del resto de la Red la información que aportan sus usuarios. Los proveedores inalámbricos de Internet se ven tentados a ralentizar el tráfico a los sitios con los que no han establecido acuerdos. Los gobiernos, sean totalitarios o democráticos, vigilan los hábitos de los internautas, con lo que ponen en riesgo derechos humanos fundamentales.

Si los usuarios dejamos que estas y otras tendencias proliferen sin control, la Red podría fragmentarse en múltiples islas. Perderíamos entonces la libertad de conectarnos con cualquier sitio web que se nos antojara. Los efectos perniciosos llegarían a los teléfonos inteligentes (*smartphones*) y los dispositivos de tableta (*pads*), que representan asimismo portales de acceso a la extensa información de la Red.

¿Por qué deben preocuparnos esas amenazas? Porque la Red es un recurso público del que dependen las personas, la actividad profesional, la sociedad y los gobiernos. Representa un instrumento vital para la democracia, un canal de comunicaciones permanente a través del mundo. Hoy desempeña una función más esencial en la libertad de expresión que cualquier otro medio. Incorpora a nuestra era de la información los principios establecidos en la Constitución de EE.UU., la Carta Magna Británica y otros im-



JOHN HENDRIX



portantes documentos: no habrá intromisiones, filtraciones, censuras ni desconexiones.

Sin embargo, solemos considerar la Red como un bien natural: si falla, solo cabe resignarse ante una de esas desgracias que no podemos evitar. Nada más falso, ya que nosotros creamos la Red mediante el diseño de sus protocolos y programas informáticos. El proceso se halla bajo nuestro control: elegimos las propiedades que debe tener la Red y descartamos las que no deseamos. En modo alguno puede considerarse acabada. Si el público, la comunidad científica y los medios de comunicación queremos informarnos sobre el Gobierno, las empresas, el estado del planeta o tratamientos contra el alzheimer, o deseamos compartir de un modo fácil fotografías con los amigos, deberemos asegurarnos de que los principios rectores de la Red se mantienen intactos: ya no solo para preservar lo que hemos conseguido, sino para aprovecharnos de los grandes avances que todavía nos aguardan.

LA UNIVERSALIDAD ES LA BASE

Varios principios resultan esenciales para garantizar una Red cada vez más valiosa. La universalidad es el postulado básico que sustenta la utilidad y el crecimiento de este sistema. Se ha de poder establecer un enlace con cualquier información; es decir, se ha de poder introducir cualquier dato desde cualquier tipo de ordenador, no importa el soporte informático o lenguaje humano que se utilice, y conectarse a Internet por hilos o vía inalámbrica. Además, tendrá que ser accesible a personas discapacitadas. Deberá operar con información de cualquier tipo, ya sea un documento o un punto de datos, y calidad, desde un bobo mensaje de Twitter a un artículo científico. Y se podrá acceder desde cualquier clase de equipo con conexión a Internet: fijo o móvil, de pequeña o gran pantalla.

Tales características parecerán obvias, autosostenidas o simplemente sin importancia, pero a ellas se debe el que encontremos sin dificultad alguna el próximo sitio web de más éxito o la nueva página del equipo local de fútbol de nuestro hijo. En cualquier sistema, la universalidad es un requisito fundamental.

La descentralización constituye otra característica importante del diseño. Para incorporar una página o establecer un enlace no se necesita la aprobación de ninguna autoridad central. Basta con utilizar tres sencillos protocolos estandarizados: escribir una página en el formato HTML (lenguaje de marcado de hipertexto), nombrarlo según el convenio de denominación URI (identificador universal de recursos) y servirlo en Internet a través del HTTP (protocolo de transferencia de hipertexto). La descentralización ha permitido difundir la innovación por doquier y seguirá haciéndolo en el futuro.

La clave de la universalidad es el URI. (En un principio denominé URI al identificador universal de recursos, que ahora se conoce como URL, localizador uniforme de recursos.) El URI nos permite acceder a cualquier enlace, sea cual sea su contenido o el autor que lo ha publicado. Los enlaces convierten el contenido de la Red en algo de mayor valor: un espacio de información interconectado.

La universalidad de la Red se ha visto amenazada en tiempo reciente. Las distribuidoras de televisión por cable que venden conectividad a Internet se están planteando limitar el acceso a sus usuarios para que solo se puedan descargar un surtido de entretenimientos de la compañía. Los sitios de redes sociales originan otro tipo de problemas. Facebook, LinkedIn, Friendster y otros aportan valor al capturar información a medida que alguien la introduce: la fecha de cumpleaños, la dirección de correo electrónico, los gustos personales y los enlaces que indican quién es amigo de quién. Los sitios estructuran esos bits en espléndidas bases de datos, información que reutilizan para proporcionar servicios de valor añadido, aunque solo dentro de sus sitios. Cada sitio viene a ser un silo, separado del resto. Sus páginas están en la Red, pero no así los datos que contienen. Se puede acceder a una página con una lista de personas creada en un sitio, pero no es posible enviar esa lista o alguno de sus elementos a otro sitio.

El aislamiento se produce porque cada porción de información no tiene un URI asignado. Solo hay conexiones entre datos dentro del mismo sitio. Por tanto, cuantos más datos se introduzcan, mayor será la congestión. El sitio de una red social se convierte en una plataforma central, un contenido cerrado que no nos permite controlar por completo la información aportada. A medida que se generaliza este tipo de arquitectura, la fragmentación de la Red avanza y nos vamos alejando del concepto de espacio de información único y universal.

El crecimiento desmesurado de un sitio de red social (o de un motor de búsqueda o navegador) conlleva el riesgo de la monopolización, lo que tiende a limitar la innovación. Como ha ocurrido desde los principios de la Red, la permanente innovación desde las raíces puede ser la mejor arma contra los intentos de empresas privadas o gobiernos de torpedear la universalidad. Mediante los proyectos GnuSocial y Diaspora, cualquier persona puede crear su red social particular desde su propio servidor y conectarse a cualquier persona de cualquier otro sitio. El proyecto Status.net, que gestiona sitios como identi.ca, permite operar una red propia semejante a la de Twitter sin la centralización que esta comporta.

INNOVACIÓN A TRAVÉS DE ESTÁNDARES ABIERTOS

Permitir que un sitio pueda vincularse a cualquier otro es necesario para contar con una Red sólida, pero no es suficiente. Los conocimientos técnicos básicos que los individuos y las empresas necesitan para desarrollar servicios eficaces en la Red deben ofrecerse gratuitamente, sin pago alguno de derechos. Amazon.com ha crecido hasta convertirse en un enorme depósito de libros, después de música y luego de toda clase de bienes. Su expansión se debe a que ha tenido acceso abierto y gratuito a los estándares técnicos sobre los que funciona la Red. Como cualquier otro usuario, Amazon podía utilizar HTML, URI y HTTP sin pedir permiso a nadie y sin pago alguno. También se le permitía aplicar mejoras a los estándares desarrollados por el Consorcio de la Red: los clientes podían rellenar una orden

EN SÍNTESIS

El principio de universalidad permite a la Red funcionar con cualquier tipo de equipo físico, soporte lógico, conexión de red o lenguaje, y manipular información de todos los tipos y calidades. Este es el principio que guía el diseño técnico de la Red.

Los estándares técnicos son abiertos y se hallan exentos de derechos; gracias a ello se pueden crear aplicaciones sin permiso de nadie ni exigencia de pago. Las patentes y los servicios de la Red que no utilizan los URI comunes como direcciones imponen límites a la innovación.

Las amenazas a Internet, como la interferencia de compañías o gobiernos en su tráfico, ponen en peligro los derechos humanos básicos de la Red.

Las aplicaciones de la Red, los datos vinculados y otras técnicas futuras solo se desarrollarán si se protegen los principios fundamentales del medio.

de pedido virtual, pagar en línea y valorar los bienes que habían comprado, amén de otras facilidades.

Entendemos como «estándares abiertos» aquellos en cuyo diseño interviene un experto cualquiera, han sido aceptados tras un detenido examen, se ofrecen gratuitamente en la Red y no exigen el pago de derechos a diseñadores ni a usuarios. Este tipo de estándares, de fácil utilización, forjan la rica variedad de sitios web, desde los famosos Amazon, Craiglist y Wikipedia hasta los blogs anónimos que crean aficionados adultos y los videos caseros publicados por adolescentes.

Esa apertura entraña que uno pueda configurar su propio sitio o compañía en la Red sin necesidad de que nadie lo apruebe. Cuando comenzó a funcionar la Red, no tuve que pedir permiso ni pagar derechos para utilizar los estándares abiertos de Internet, como el protocolo de control de transmisión (TCP) y el protocolo de Internet (IP). De modo análogo, la política del Consorcio de la Red sobre derechos de patentes establece que las compañías, universidades e individuos que contribuyan al desarrollo de un estándar no deben exigir pago de derechos a quienes lo empleen.

El que un estándar sea abierto y exento de derechos no impide que una compañía o individuo pueda idear un blog o un programa para compartir fotografías y cobrar por su uso. Y el usuario tiene libertad para pagarlo, si lo prefiere a otros. El quid de un estándar abierto es que permite numerosas opciones, sean o no gratuitas.

Por supuesto, muchas compañías invierten dinero en el desarrollo de aplicaciones extraordinarias porque confían en que resultarán útiles para cualquier persona, con independencia del equipo informático, sistema operativo o proveedor de servicios de Internet (ISP) de que disponga: todo ello, gracias a los estándares abiertos. Esta misma confianza alienta a los científicos a configurar increíbles bases de datos que permitan el intercambio de información sobre proteínas, con la esperanza de curar enfermedades. Algunos gobiernos, como los de EE.UU. y el Reino Unido, ofrecen cada vez más datos en línea con el objetivo de aumentar la transparencia de su gestión.

Por el contrario, el empleo de estándares no abiertos origina mundos aislados. El sistema iTunes de Apple, por ejemplo, identifica canciones y vídeos por medio de URI que están abiertos. Pero en lugar de «http:», las direcciones comienzan por «itunes:», que está patentado. Solo se puede acceder a un enlace «itunes:» a través del programa iTunes patentado por Apple. Resulta imposible establecer un enlace con cualquier información perteneciente al mundo iTunes, como canciones o datos sobre bandas de música. El mundo iTunes es centralizado y cerrado; nos hallamos limitados a una sola tienda, en vez de un mercado abierto. Y por muchas lindezas que esta ofrezca, su evolución está condicionada a las ideas de una empresa.

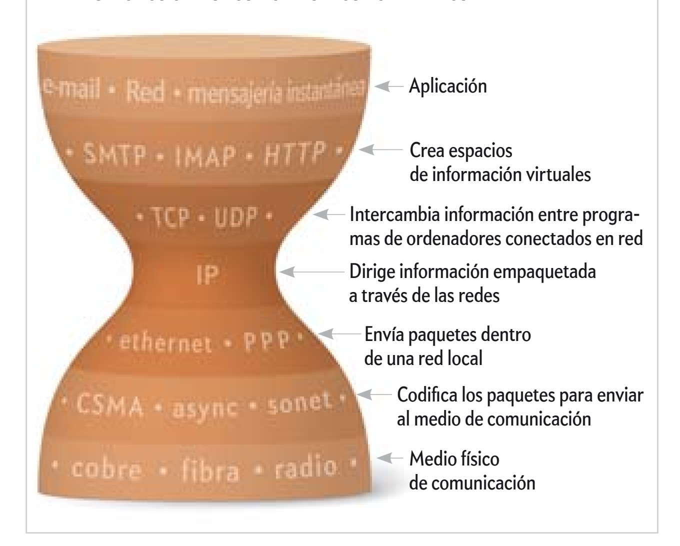
Hay otras compañías que están creando mundos cerrados. La tendencia de las revistas a producir aplicaciones (*app*) para teléfonos inteligentes en vez de para la Red es perjudicial. Ese contenido no se halla en la Red: no es posible marcarlo como favorito ni dirigir un correo electrónico a un enlace con una de sus páginas. Ni tampoco enviarle un *tweet*. Es mejor construir una aplicación de la Red que también se ejecute en navegadores de teléfono inteligente: día tras día avanzan las técnicas para conseguirlo.

Habrá quien considere maravillosos los mundos cerrados. Son de fácil manejo y en apariencia dan a la gente lo que desea. Pero la experiencia de los años noventa sobre el sistema America Online (luego AOL) —que ofrecía acceso en línea a un subconjunto de la Red— nos enseñó que estos «jardines vallados», por muy agradables que sean, nunca pueden competir en diversidad, riqueza e innovación con el enloquecido y palpitante mercado de la Red.

PRINCIPIO FUNCIONAL

¿Red o Internet?

La Red es una aplicación que se ejecuta en Internet, lo mismo que la mensajería instantánea. Internet corresponde a una red electrónica que divide la información en paquetes y la hace circular entre ordenadores a través de hilos o medios inalámbricos, siguiendo sencillos protocolos (reglas) denominados con diversos acrónimos. Internet y sus aplicaciones se pueden representar por capas conceptuales apiladas; cada una de ellas utiliza los servicios prestados por la capa inmediatamente inferior. Las aplicaciones son comparables a unos utensilios domésticos conectados a la red eléctrica.



JEN CHRISTIANSEN

MANTENER LA SEPARACIÓN ENTRE LA RED E INTERNET

Conservar la universalidad de la Red y la apertura de sus estándares ayuda a la invención de nuevos servicios. Pero hay un tercer principio, la separación de las capas, que diferencia los propósitos de la Red y de Internet.

Esta separación resulta fundamental. La Red es una aplicación que se ejecuta en Internet, un sistema electrónico que transmite paquetes de información entre millones de ordenadores siguiendo un reducido número de protocolos abiertos. Podríamos comparar la Red con un utensilio doméstico conectado a la red eléctrica. El frigorífico o la impresora pueden funcionar siempre que cumplan unos protocolos estándar: 120 voltios y 60 hercios en EE.UU., 110 voltios y 50 hercios en España. Análogamente, cualquier aplicación es ejecutable en Internet si utiliza ciertos protocolos estándar como los TCP (protocolo de control de transmisión) e IP (protocolo de Internet).

La fabricación de los frigoríficos e impresoras puede perfeccionarse sin que por ello se altere el funcionamiento de la electricidad, y viceversa, cualquier mejora de la red eléctrica por las compañías suministradoras no modificará la utilidad de los electrodomésticos. Las dos capas de la técnica trabajan unidas pero avanzan por separado. Sucede lo mismo con la Red e Internet. La separación de las dos capas es crucial a efectos de innovación. En 1990 la Red se extendió sobre Internet sin ocasionar en él ningún cambio; lo mismo ha ocurrido con todas las mejoras introducidas desde entonces. Durante ese tiempo las conexiones

de Internet han elevado su velocidad desde 300 bits por segundo hasta 300 millones de bits por segundo (Mb/s), y no ha habido que rediseñar la Red para aprovechar tales mejoras.

DERECHOS HUMANOS ELECTRÓNICOS

Pese a la separación entre Internet y la Red, el usuario de uno también lo es de la otra, y por lo tanto confía en que Internet no sufra interferencias. En la primera época de la Red, una compañía o un gobierno carecían de capacidad técnica para manipular Internet e interferir así con un usuario de la Red. Hoy, sin embargo, las técnicas son mucho más efectivas. En 2007 BitTorrent, una compañía cuyo protocolo de red entre unidades pares («*peer-to-peer*» o P2P) permite a los usuarios compartir música, vídeos y otros archivos en Internet, se quejó a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de EE.UU. de que Comcast, el gigantesco proveedor de servicios de Internet (ISP), estaba bloqueando o retrasando el tráfico a los abonados que utilizaban la aplicación BitTorrent. La FCC ordenó a Comcast que cesara esa práctica pero, en abril de 2010, un tribunal federal sentenció que la FCC no podía ordenar tal cosa. Un buen ISP gestionará el tráfico de manera que cuando el ancho de banda sea escaso se pierda menos tráfico esencial. Lo hará de un modo transparente, por lo que los usuarios estarán informados. Existe una línea divisoria importante entre ese tipo de actuación y el uso de la misma potencia con fines discriminatorios.

Esta distinción subraya el principio de neutralidad de la Red. Este sostiene que si hemos pagado una conexión a Internet de cierta calidad, póngase por caso 300 Mb/s, nuestras comunicaciones deben establecerse con ese nivel de calidad. Respetar ese concepto evitaría que un ISP de gran capacidad nos enviara a 300 Mb/s un vídeo procedente de una compañía de su propiedad y, en cambio, redujera la velocidad de envío de un vídeo de un medio competidor, lo que supone una discriminación comercial. Podrían surgir además otras complicaciones. ¿Qué pasaría si nuestro ISP nos facilitara la conexión a una determinada tienda en línea de zapatos, pero nos la dificultara a las demás? El control sería abusivo. ¿Y si el ISP frenara nuestro acceso a sitios web que atañen a partidos políticos o religiones, o que traten sobre la evolución?

Por desgracia, Google y Verizon sugirieron el pasado agosto que la neutralidad de la Red no debiera aplicarse a las conexiones por teléfono móvil. Muchos habitantes de zonas rurales, desde Utah a Uganda, solo pueden acceder a Internet a través de la telefonía móvil; excluirlos de la neutralidad de la Red los dejaría expuestos a una discriminación de servicio. Tiene poca gracia pensar que nuestro derecho fundamental de acceso a una fuente de información se respete cuando estamos en casa, ante un ordenador con conexión Wi-Fi, pero no cuando utilizamos el teléfono celular.

Un medio de comunicación neutral es la base de una economía de mercado limpia y competitiva, de la democracia y de la ciencia. El año pasado se suscitó un debate acerca de la necesidad de una legislación gubernamental para proteger la neutralidad de la Red. Aunque Internet y la Red suelen prosperar en ausencia de regulación, ciertos valores esenciales requieren una protección legal.

VETAR A LAS INJERENCIAS

Otra de las amenazas que sufre la Red se debe a las intromisiones en Internet. En 2008, la compañía Phorm ideó un procedimiento para que un ISP husmeara en los paquetes de información que estaba enviando. El ISP podía determinar todos los URI visitados por un cliente durante su navegación y crear a continuación un perfil de esos sitios con el fin de lanzar una publicidad dirigida.

Acceder a la información contenida en un paquete de Internet equivale a una escucha telefónica o a la apertura de un envío postal. Los URI que frecuentan las personas revelan en parte su modo de ser. Una empresa podría comprar los perfiles URI de los que buscan empleo con el fin de discriminarlos según sus tendencias políticas. Las compañías de seguros de vida podrían rechazar a quienes hayan consultado sitios web para informarse sobre síntomas cardíacos. Todos utilizaríamos la Red de muy

DE CARA AL PORVENIR

La Red del futuro

Se están desarrollando varias tendencias interesantes, basadas en los principios esenciales de la Red, que podrían cambiar el modo de operar del mundo virtual y del mundo físico. Véase en «Para saber más» un enlace hacia comentarios y vídeos sobre estas cuatro tendencias:

LIBRE ACCESO A LOS DATOS
La introducción de datos en la Red y su vinculación ofrece nuevas posibilidades a las personas. Ha servido para evitar accidentes a los ciclistas londinenses, revelar discriminaciones en Ohio y ayudar a salvar vidas tras el terremoto de Haití.

CIENCIA DE LA RED
Apenas hemos empezado a entender el modo en que la Red refleja y da forma al mundo real. La ciencia de la Red, nueva disciplina impartida en varias instituciones, descubre interesantes perspectivas sobre su diseño, funcionamiento e influencia en la sociedad.

MÁQUINAS SOCIALES
Numerosas personas envían encuestas y valoraciones de restaurantes que influyen en las decisiones de los futuros dueños. Esta actividad constituye un ejemplo de máquina social. Se están diseñando aparatos más complejos con capacidad de mejorar el trabajo científico y el proceso democrático.

ANCHO DE BANDA GRATUITO
En los países en desarrollo, pocos pueden permitirse el acceso a Internet. Un servicio gratuito de muy poca anchura de banda podría mejorar enormemente la educación, la salud y la economía, y al tiempo animar a algunos a contratar un servicio de pago, más rápido.



JOHN HENDRIX

distinto modo si supiéramos que nuestros pasos son vigilados y nuestros datos son observados por personas ajenas.

La libertad de expresión debería asimismo protegerse. La Red debe ser como una hoja de papel en blanco: preparada para escribir en ella pero sin control alguno sobre lo escrito. A principios del año pasado Google acusó al gobierno de China de piratear sus bases de datos para extraer las direcciones electrónicas de sus disidentes. Las intromisiones se produjeron tras haber rechazado Google la petición que le formuló ese gobierno de censurar ciertos documentos en su buscador en lengua china.

No solo los gobiernos totalitarios violan los derechos de sus ciudadanos en la Red. En 2009 se dictó en Francia la ley Hadopi, por la cual, una nueva agencia de ese mismo nombre podía desconectar de Internet durante un año a un usuario doméstico si algún medio audiovisual alegaba que se había descargado música o vídeos. En el Reino Unido, la Ley de Economía Digital, aprobada a toda prisa el pasado abril, faculta al Gobierno para ordenar a un ISP que suspenda la conexión a Internet a todos los que figuren en una lista de presuntos infractores de los derechos de autor. El pasado septiembre, el Senado de EE.UU. promulgó la Ley para Combatir Infracciones y Falsificaciones en Línea, por la cual se autoriza al Gobierno a crear una lista negra de sitios web —hospedados dentro o fuera de territorio estadounidense— que estén acusados de infracción, así como a instar o exigir a todos los ISP que bloqueen el acceso a tales sitios. [El Parlamento español está debatiendo una ley que prevé el cierre de páginas web que faciliten sin permiso la descarga de archivos protegidos por derechos de autor.]

No hay proceso legal que proteja a las personas frente a la suspensión de la conexión a Internet o al bloqueo de sus sitios web. Dados los numerosos aspectos esenciales en que la Red afecta nuestras vidas y nuestro trabajo, la desconexión viene a ser una pérdida de libertad. Si recordamos la Carta Magna, tal vez debamos ahora afirmar: «Ninguna persona u organización deberá ser privada de la capacidad de conectarse con las demás sin el debido proceso legal y la presunción de inocencia».

Ante la violación de nuestros derechos en la Red, el clamor público resulta esencial. Ciudadanos del mundo entero protestaron contra la petición de China a Google, hasta el punto de que la Secretaria de Estado Hillary Clinton expresó que el Gobierno de EE.UU. respaldaba el rechazo de Google y que la libertad en Internet —y por tanto, en la Red— debería convertirse en punto esencial de la política exterior estadounidense. El pasado mes de octubre, Finlandia estableció el acceso en banda ancha, a 1 Mb/s, como derecho legal de todos sus ciudadanos.

UN PASO HACIA EL FUTURO

Mientras se mantengan los principios básicos de la Red, su evolución no se hallará en manos de ninguna persona ni organización, lo que nos promete un futuro lleno de posibilidades.

La última versión del HTML, llamada HTML5, no es un mero lenguaje de marcado o etiquetado, sino una plataforma de computación que producirá aplicaciones de la Red aún más potentes que las actuales. La proliferación de teléfonos inteligentes acentuará el céntrico papel de la Red en nuestras vidas. El acceso inalámbrico representará un verdadero avance para los países en desarrollo, donde muchas personas no pueden conectarse por hilo o cable. Quedan muchos aspectos por resolver, por supuesto, como la accesibilidad para discapacitados y el diseño de páginas que funcionen en toda clase de pantallas, desde las enormes en 3D que cubren una pared hasta las del tamaño de un reloj de pulsera.

Una mejora de suma importancia en el futuro consistirá en la vinculación de los datos, que necesita el apoyo de todos los principios. La Red actual ayuda eficazmente a publicar y descubrir documentos, pero nuestros programas informáticos no pueden leer ni manipular la información que contienen. En cuanto se resuelva este problema, la Red resultará más útil, ya que los datos relativos a casi todos los aspectos de nuestra vida aumentan a una velocidad asombrosa. Dentro de esos datos se encierran conocimientos sobre tratamientos de enfermedades, revalorización de empresas y formas de gobierno más acertadas.

Hay científicos destacados en la vanguardia de algunos de los proyectos más importantes para situar datos vinculados en la Red. Se está comprobando así que, en muchos casos, ningún laboratorio ni almacén de datos en línea es autosuficiente para descubrir nuevos fármacos. La información necesaria para comprender las complejas interacciones entre patologías, procesos biológicos en el cuerpo humano y el vasto conjunto de agentes químicos está desparramada por todo el mundo en innumerables bases de datos, hojas de cálculo y documentos.

Uno de los éxitos hace referencia a la investigación de fármacos para combatir la enfermedad de Alzheimer. Varios laboratorios privados y públicos aceptaron compartir sus datos y crearon la Iniciativa para el Tratamiento por Neuroimagen de la Enfermedad de Alzheimer. Aportaron como datos vinculados una enorme cantidad de información y escáneres cerebrales de pacientes. En una demostración que presencié, un científico preguntó: «¿Qué proteínas intervienen en la transducción de señales y están relacionadas con neuronas piramidales?». Cuando se introdujo en Google la pregunta, se obtuvieron 233.000 accesos y ninguna respuesta única. Sin embargo, al traspasarla al mundo de las bases de datos vinculadas, solo cumplían tales propiedades un pequeño número de proteínas.

Los sectores de inversiones y finanzas también pueden aprovecharse de los datos vinculados. El beneficio se genera al hallar patrones dentro de un repertorio de fuentes de información cada vez más variado. La vinculación afecta asimismo a la información sobre nuestra vida privada. Cuando acudimos a nuestro sitio de red social e indicamos que un recién llegado es nuestro amigo, se establece una relación, en realidad definida por datos.

Los datos vinculados plantean ciertas cuestiones que tendremos que abordar. Las nuevas posibilidades de integración de datos podrían encerrar amenazas a la privacidad, aspecto apenas considerado por las leyes actuales. Deberíamos examinar las opciones legales, culturales y técnicas que preservarán la privacidad sin reprimir las ventajas de compartir datos.

Vivimos una época fascinante. Diseñadores, empresas, gobiernos y ciudadanos deben trabajar con un talante abierto y cooperativo, como hasta ahora lo han hecho, para preservar los principios fundamentales de la Red. Deben garantizar que los protocolos técnicos y los convenios sociales respeten los valores humanos. La finalidad de la Red es servir a la humanidad. La construimos ahora para que los que vengan después puedan crear innovaciones que ni siquiera podemos imaginar.

PARA SABER MÁS

Creating a science of the web. Tim Berners-Lee et al. en *Science*, vol. 313, 11 de agosto de 2006.

Página principal del Web Science Trust: **www.webscience.org**

Notas de Tim Berners-Lee sobre diseño de la Red y otros temas: **www.w3.org/DesignIssues.**

Página principal del Consorcio Mundial de la Red: **www.w3.org**

La Fundación World Wide Web financia y coordina los esfuerzos que demuestran el servicio de la Red a la humanidad: **www.webfoundation.org**

por Xavier Roqué



Xavier Roqué es profesor de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona.

Curie confidencial

Releer a la descubridora del radio y del polonio, cien años después de su segundo Nobel

Con este artículo, dedicado a Marie Curie y la radiactividad en el Año Internacional de la Química, cuando se cumplen cien años de la concesión del premio Nobel de Química a la más célebre mujer de ciencia, inauguramos una nueva sección de Investigación y Ciencia. Con la colaboración de historiadores expertos, dedicaremos estas páginas a trabajos que arrojan nueva luz sobre el pasado de las ciencias y nos llevan a reconsiderar su situación actual.

Comenzamos con un extracto adaptado de la introducción a la primera edición en castellano de los textos biográficos de Marie Curie, publicada por el nuevo sello Campus Editorial. La edición nos brinda la oportunidad de volver sobre unos textos que han ejercido una enorme influencia, no siempre benéfica, sobre nuestra percepción de Curie: leídos durante décadas bajo los efectos del mito, habían perdido buena parte del sentido que quiso darles una mujer real. Algo parecido ocurre con la radiactividad. El radio y las sustancias radiactivas transformaron la ciencias fisicoquímicas y biomédicas, se erigieron en poderosas armas contra el cáncer, se convirtieron en los objetos de investigación más codiciados y se asentaron firmemente en el imaginario público como agentes de progreso y destrucción. Pero nada de ello era evidente hace cien años, pues los cambios propiciados por el descubrimiento de la radiactividad se insertan en un complejo proceso dilatado en el tiempo y con múltiples protagonistas —científicas como Curie, desde luego, pero también periodistas, empresarios, médicos, diplomáticos, militares y jefes de Estado—. En 2011, tras 2005 (Año Internacional de la Física), corremos una vez más el riesgo de reducir este proceso a una imagen estática tomada hace cien años. Una manera de evitarlo es prestar atención a la forma en que se generó el perfil público de Curie como mujer de ciencia y, con él, el de la radiactividad.

La trayectoria personal y profesional de Pierre Curie (1859-1906) y Marie Curie (1867-1934) despertó, muy a su pesar, una atención mediática inusitada desde que en 1903 les fuera concedido el Nobel de Física, junto a Henri Becquerel, por el descubrimiento de la radiactividad. Los lectores de la prensa diaria e ilustrada asistieron orgullosos a la ceremonia de concesión del premio en Estocolmo; lloraron la muerte en accidente de Pierre Curie en 1906; se dividieron cuatro años después ante la candidatura de Marie Curie a la Academia de Ciencias y la revelación de su *affaire* con el físico Paul Langevin; celebraron el segundo Nobel de Marie, esta vez en solitario y de Química, concedido en 1911 por el descubrimiento del radio y el polonio; se emocionaron con las imágenes de Curie al volante de sus ambulancias radiológicas (las *petite Curie*) en los frentes de la Primera Guerra Mundial; y participaron, en fin, de la campaña por la institucionalización de la radiactividad que consumió las energías de Curie en la etapa final de su vida, campaña que propició la redacción de los textos que ahora ven la luz en castellano. Su biografía de Pierre Curie, redactada a raíz del viaje que realizó a Estados Unidos en 1921 para recoger de manos del presidente Warren G. Harding, en la Casa Blanca, un gramo de radio donado por «las mujeres de América», y las «Notas autobiográficas» que acompañaron la edición en inglés de la biografía, publicada en 1923, son dos textos muy reveladores sobre las relaciones de género, la historia de la radiactividad y el valor social de la ciencia en las primeras décadas del siglo xx.

Esos textos ejercieron desde su publicación una gran influencia. La narración en primera persona de la epopeya del radio fijó la imagen de Curie como icono radiactivo. La exposición a la prensa convenció a Curie de que si no se construía como personaje público alguien lo haría por ella. Lo mismo pensó Ève Curie (1904-2007) al redactar sin demora la primera biografía de su madre, temerosa de que «alguien lo hiciera antes, y no lo hiciera bien». La hagiografía de la hija menor de los Curie, publicada en 1938, consagró la imagen heroica de una científica pura y una mujer extraordinaria. Numerosas fotografías muestran a Curie sola en su laboratorio, «un lugar único para el trabajo y la meditación, aislado del mundo» y envuelto «en una atmósfera de paz y recogimiento». Sin embargo, pese a su ubicuidad o tal vez a causa de ella, esta imagen es sumamente equívoca porque eclipsa elementos cruciales para entender los logros personales y científicos de Curie: la adopción de un modelo parental y profesional nada común, y la colaboración entre el laboratorio y la fábrica a lo largo del ciclo vital del radio.

Se impone pues releer a Curie. Y es un buen momento para hacerlo. En las dos últimas décadas la historiografía de Curie ha dado un vuelco, y con ella la de las circunstancias que rodearon la producción y recepción de sus textos biográficos. La aparición en 1995 de la biografía de Susan Quinn, que había tenido acceso al diario personal de Curie, reveló aspectos poco conocidos de su persona; al mismo tiempo, los trabajos de una generación de historiadores que no separaban artificialmente la radiactividad de la política o la economía, condujo a la reconsideración en profundidad de la función del laboratorio Curie en el estudio, la producción y las aplicaciones del radio. Esta nueva visión de Curie empieza a dejarse ver en las biografías y exposiciones recientes, pero ¿cómo se refleja en sus textos?

Trabajo y familia

El entorno familiar de Curie jugó un papel determinante en su trayectoria profesional desde su infancia en Polonia. Según las notas autobiográficas, Pierre y Marie Curie siguieron una «vía antinatural», con una «existencia... completamente

organizada con vistas al trabajo científico» de la que habían excluido «las preocupaciones de la vida mundana» y unas relaciones sociales limitadas a la familia y el círculo de amigos íntimos. Para Marie Curie, estas disposiciones domésticas eran una condición necesaria de sus logros científicos: «Gracias a esta forma de vida tranquila, organizada según nuestros deseos, pudimos realizar el gran trabajo de nuestras vidas». El éxito profesional de los Curie responde en buena medida a la buena gestión simultánea de los ámbitos doméstico y profesional y a la adopción de soluciones nada extraordinarias a problemas que siguen en pie.

El trabajo en pareja, sin embargo, entrañaba sus riesgos. La historiadora Margaret W. Rossiter ha descrito la falta de reconocimiento de mujeres que habían colaborado con colegas masculinos, fueran pareja o no. En el caso de los Curie, la delimitación de sus respectivas contribuciones en las publicaciones conjuntas fue crucial para asegurar el reconocimiento de Marie. Su primer trabajo sobre radiactividad lo firmó como Mme. Sklodowska Curie para que nadie la confundiera con M[*essieur*]. Curie. Medidas como esta, tomadas a conciencia, permitieron a los Curie colaborar sin perjudicarse.

Ciencia e industria

Si el descubrimiento del radio constituye el eje de la obra científica de los Curie, la extrema rareza del nuevo elemento determinó su aproximación a los fenómenos radiactivos. Al iniciar el estudio de los minerales de uranio, los Curie pesaban la pechblenda en gramos y creían que el elemento radiactivo que se ocultaba en su interior aportaba una centésima del peso; poco después, tras anunciar el descubrimiento del radio, pesaban la pechblenda en toneladas y sabían que la proporción de radio era inferior a una millonésima. La concentración del radio en la pechblenda y otros minerales era «prodigiosamente débil» y determinó la colaboración de los Curie con la industria de los radioelementos. El concurso de la industria era necesario para concentrar los radioelementos y estudiar sus propiedades; pero para diseñar los procedimientos industriales de extracción debía conocerse el comportamiento fisicoquímico de los radioelementos. En este argumento circular descansaba la significación científica de las relaciones industriales de los Curie: «Si queremos estudiar los radioelementos, debemos fabricarlos».



Marie Curie visita la planta de la Standard Chemical Company en Canonsburg (Pittsburgh), acompañada del presidente de la empresa, James Gray, y del director técnico, F. Vogt.

La colaboración inicial con la industria tuvo lugar en ausencia de un mercado para el radio, pero la situación cambió radicalmente en 1903 con la observación de los primeros efectos biológicos de la radiactividad y las enormes expectativas generadas por sus aplicaciones terapéuticas. En Francia, un fabricante de quininas, Émile Armet de Lisle, reorientó su empresa hacia la producción de sales de radio, estableciendo una relación simbiótica con el laboratorio Curie: la empresa se nutría del personal técnico y el conocimiento experto de la pareja de premios Nobel, mientras el laboratorio recibía una asistencia logística vital. La geopolítica del uranio llevaría a Curie a cooperar con empresas de todo el mundo, desde la Société Minière Industrielle Franco-Bresilienne a la Standard Chemical Company, pasando por la Union Minière du Haut Katanga.

«Querido Pierre»

La muerte de Pierre Curie, atropellado por un carruaje en París el 19 de abril de 1906, amenazó la continuidad de los trabajos del radio y la dotación de un nuevo laboratorio. A las dos semanas del accidente, Marie Curie empezó a escribir una serie de cartas dirigidas a Pierre en su diario personal. Las cartas muestran crudamente el dolor y la atenuación del dolor, las preocupaciones constantes que le impiden pensar en Pierre, el deseo de continuar con la investigación y la angustia por tener que ocupar el lugar de Pierre en la Sorbona. Marie aceptó la cátedra de Pierre Curie en la Facultad de Ciencias de París «con la esperanza de que un día, en memoria suya, podría edificar el laboratorio que él merecía y no llegó a tener». En el breve capítulo que cierra la biografía, Curie vincula las reacciones inmediatas a la desaparición de Pierre con la materialización del laboratorio que habían soñado.

En 1912 se inauguró en París el Instituto del Radio, una iniciativa conjunta del Instituto Pasteur y la Universidad de París, sin duda el mayor logro institucional de Marie Curie. La expansión de las instalaciones y las actividades del instituto requirió de su directora, tras la Primera Guerra Mundial, un intenso trabajo de captación de fondos, que nada ejemplifica mejor que el viaje a Estados Unidos y los textos biográficos que generó.

Se cierra el círculo y entendemos el sentido de las últimas frases de la biografía de Pierre: «¿Cómo recompensa nuestra sociedad a los científicos por el admirable don que hacen de sí mismos y por los magníficos servicios que prestan a la humanidad? ¿Disponen estos servidores de la idea de medios de trabajo? [...] Actualmente, ni los poderes públicos ni la generosidad privada conceden a la ciencia y a los científicos la ayuda y los recursos indispensables para un trabajo plenamente eficaz». Curie invocaba a continuación el célebre alegato de Louis Pasteur a favor «de estas estancias sagradas a las que de manera expresiva denominamos laboratorios. Exigid que se multipliquen y reciban la dotación que necesitan». Desinterés personal a cambio de recursos públicos: Curie no distinguía entre ciencia pura y ciencia aplicada, sino entre ciencia pública y ciencia privada. La importancia de las aplicaciones del radio y su valor de mercado recomendaban hacer de la radiactividad una ciencia pública, y a ello dedicó Curie sus últimos esfuerzos.

PARA SABER MÁS

Science, medicine and industry: The Curie and Joliot-Curie laboratories. Dirigido por Soraya Boudia y Xavier Roqué, *History and Technology* (número especial), vol. 13, n.º 4, págs. 241-353, 1997.

Marie Curie y su tiempo. José Manuel Sánchez Ron. Crítica, Barcelona, 2000.

Curie. Sarah Dry. Tutor, Madrid, 2006.

Curie confidencial: los escritos biográficos. Dirigido por Xavier Roqué. Campus Editorial, Bellaterra (*en prensa*).

por Narcís Prat

Narcís Prat es catedrático de ecología en la Universidad de Barcelona y miembro fundador de la Fundación Nueva Cultura del Agua.



La gestión del agua en España

La planificación hidrológica sigue sin adaptarse a las directivas europeas

Los turistas del norte de Europa que se bañan en las aguas del mediterráneo no suelen ser conscientes del esfuerzo que supone para los oriundos que dispongan de agua corriente en una ducha al borde de la playa. Tampoco son conscientes de las batallas sobre el agua que ha desatado el zumo de naranja que beben en el desayuno o el aceite de oliva que aliña sus ensaladas. En España, el 80 por ciento del agua se consume en el regadío agrícola destinado en gran parte a la exportación de productos frescos o que surte a la agroindustria para que turistas y españoles degustemos excelentes jamones y solomillos. El agua se halla presente en todos y cada uno de los actos de nuestra vida, aunque apenas nos demos cuenta. Su consumo para múltiples actividades ha dado lugar a un fuerte impacto ambiental, con más de mil grandes presas, millones de pozos, ríos con caudal alterado y aguas contaminadas.

Hasta el año 2000, los recursos hídricos se gestionaban en función de los usos del agua y se consideraba que los problemas de contaminación debían resolverse mediante las depuradoras. Desde aquel año, con la aprobación de la Directiva Marco del Agua (DMA), este concepto ha cambiado: hablamos ahora del «estado ecológico». Ello implica que la calidad del agua depende del estado de salud de los ecosistemas acuáticos, que se mide a partir de indicadores biológicos. En teoría, con la DMA la planificación hidráulica tradicional debería dar paso a un verdadero plan de gestión en el que el recurso no fuera el único elemento clave de la planificación, como lo fue en el pasado. Además, la DMA fijó en el 2009 el plazo para presentar este plan. Sin embargo, según el último informe elaborado por el Observatorio de seguimiento de la implementación de la DMA («La planificación hidrológica y la Directiva Marco del Agua en España: Estado de la Cuestión»), a finales de 2010, solo una demarcación hidrográfica española (Cataluña) había presentado su plan de gestión; el resto, o bien ni siquiera tenían un borrador o lo acababan de publicar.

En la mayoría de los borradores se nota la tensión entre la planificación hidráulica y la ecosistémica que define la DMA. Aunque las confederaciones han realizado un diagnóstico del estado ecológico más o menos acorde con lo que demandaba la DMA y proponen un plan de medidas para conservar lo que se halla en buen estado o restaurar lo que está por debajo del mismo, los planes siguen siendo básicamente un balance entre recursos y demandas donde cada actor intenta que se priorice su parte del pastel.



El resultado final no es muy positivo: se ha primado el «recurso» y se ha perdido la oportunidad de planificar con criterios de sostenibilidad ambiental (con la excepción del único plan aprobado hasta la fecha que ya está en Bruselas). La tensión que las propuestas de caudales ambientales ha provocado entre las confederaciones y los ecologistas muestra esta problemática. Los estudios científicos indican que la mayoría de nuestros ríos llevan caudales insuficientes para garantizar el buen estado ecológico. Por tanto, hoy en día no es posible pensar en nuevas concesiones de agua para el regadío, sino que muchas de las actuales deberían revisarse a la baja y más aún si pensamos en los posibles efectos del cambio climático, aspecto que no se ha abordado de forma clara en los planes actuales.

El problema principal es que la gestión del agua en España constituye un asunto político, no científico. La mayoría de comunidades autónomas han tratado de blindar en sus estatutos la parte de los recursos de su cuenca o cuencas que según ellos les pertenecen. Los partidos tradicionales rompen su obediencia al comité nacional en los asuntos del agua, alineándose con sus enemigos para no perder votos en su comunidad. Los trabajos técnicos realizados por los funcionarios o los gabinetes de estudio —algunos de ellos muy buenos— son convenientemente descafeinados cuando las conclusiones a las que llegan no convienen desde el punto de vista político. Parece que el siglo xxi, en lugar de producir un cambio de rumbo de la política del agua hacia la racionalidad científica, nos conduce, de mano de gobiernos ciegos, a la política hidráulica tradicional.

Cuando se acercan las elecciones, nuestros dirigentes aparcan la ciencia, la investigación y los trabajos rigurosos de los propios técnicos de la administración para dejar paso a criterios políticos de corto plazo. Mientras en Europa la calidad de los ecosistemas guía los planes de gestión, lo que genera una actividad económica basada en la ciencia y la innovación, en España nos quieren condenar a la política del cemento, que tan «buenos» resultados económicos ha dado en los últimos años. Esperemos que al final la racionalidad científica se abra paso y podamos convencer a nuestros ciudadanos de que nos conviene fiarnos más de la investigación y la ciencia que de las promesas vanas de unos políticos a los que solo les interesan las próximas elecciones.

MARIA RIERADEVALL Y NARCÍS PRAT

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
   Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
   El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
   Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
   Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
   Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
   Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
   El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
   Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
   Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **PSICOLOGÍA**
   Trastornos mentales, Memoria y aprendizaje, La consciencia

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

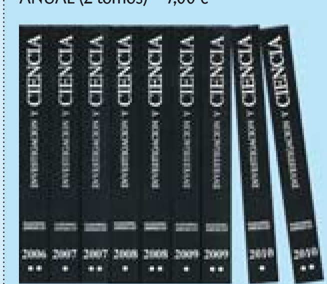
TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50 €

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00 €

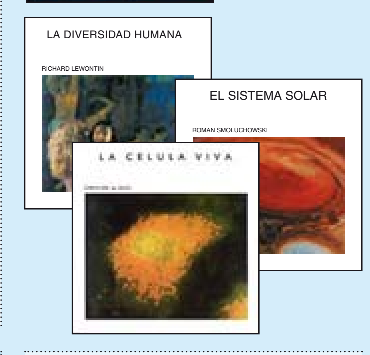


Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00 €





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos	
España: 2,80 €	Otros países: 14,00 €

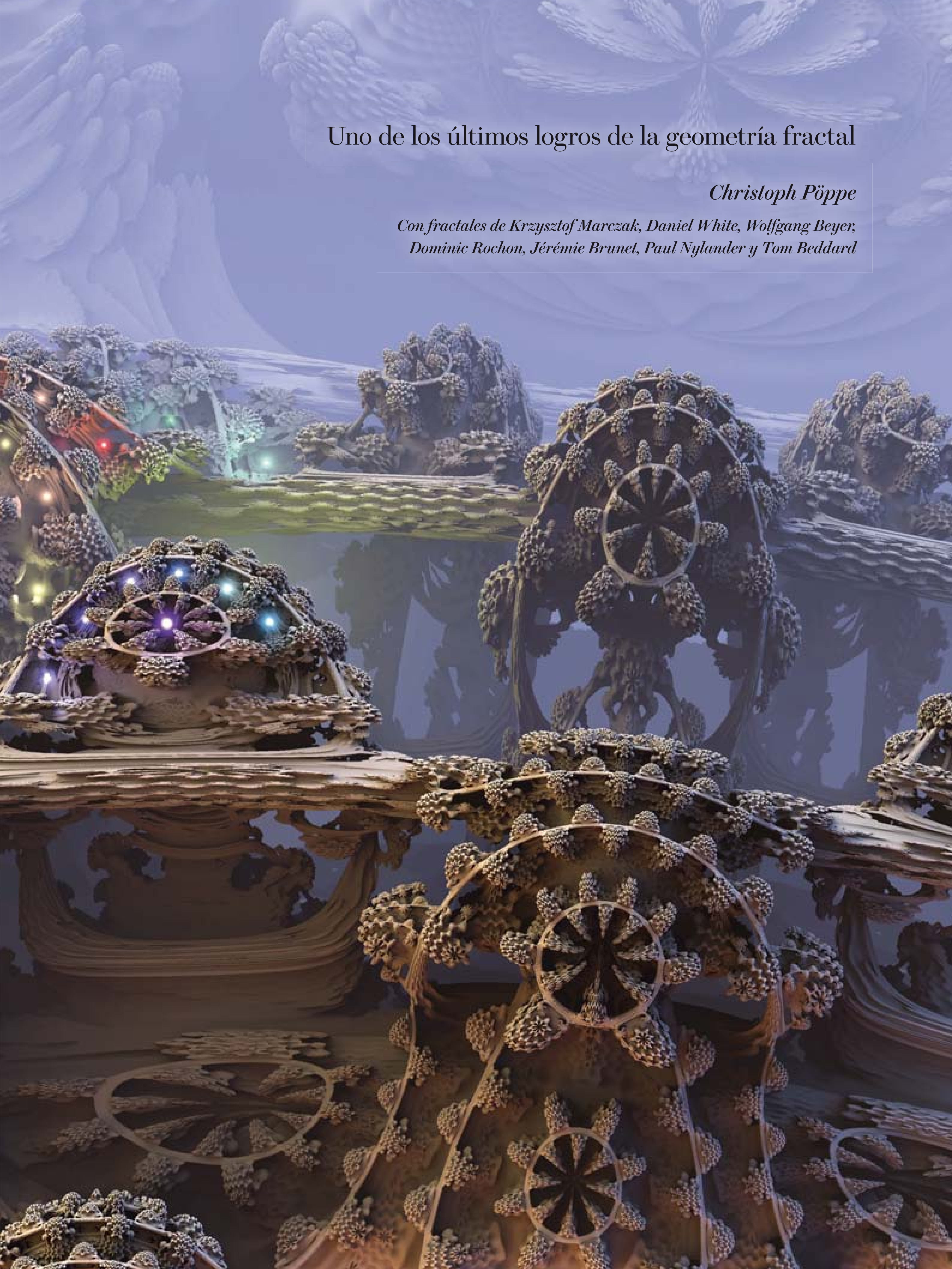
Oferta Colección BSA	
España: 7,00 €	Otros países: 60,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

El conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones



Un «bulbo de Mandelbrot» en la niebla, de Daniel White: En dspwhite.deviantart.com/art/The-Eternal-Dream-149572608 puede leerse la historia del alma solitaria que, desterrada hace 800.000 años a este asteroide —una gigantesca copia del bulbo de Mandelbrot excavada en carbono—, se ve abocada a explorar sus detalles hasta hallar la clave de su salvación: un pequeño objeto brillante y de forma piramidal.



Uno de los últimos logros de la geometría fractal

Christoph Pöppe

Con fractales de Krzysztof Marczak, Daniel White, Wolfgang Beyer, Dominic Rochon, Jérémie Brunet, Paul Nylander y Tom Beddard

Christoph Pöppe es doctor en matemáticas y redactor de *Spektrum der Wissenschaft*, edición alemana de *Scientific American*.



Se trata del objeto más popular de la geometría fractal. Desde que en 1978 Benoît Mandelbrot descubriese el conjunto que hoy lleva su nombre, tanto aficionados como profesionales han invertido millones de horas de cálculos con ordenador para explorar la geometría, cada vez más bella, de sus innumerables ramificaciones. Según una definición más estricta, sin embargo, el conjunto de Mandelbrot no es ningún fractal, ya que carece de la propiedad de autosemejanza. Si estudiamos su frontera con un detalle cada vez más fino, no veremos repetirse las mismas estructuras, sino algo mucho mejor: geometrías siempre nuevas.

Este particular subconjunto del plano no puede quejarse de falta de atención por parte de los expertos. A menudo, parece que los matemáticos no tienen nada más urgente que hacer que generalizar cada resultado bidimensional a tres, cuatro o incluso infinitas dimensiones. Pero el conjunto de Mandelbrot ha venido resistiéndose durante años a levantarse del plano. Y ello no se debe a que, por regla general, los fractales se vean condenados a vivir en dos dimensiones. Más bien al contrario: fue el mismo Mandelbrot quien nos hizo apreciar la gran cantidad de fractales tridimensionales que nos ofrece la naturaleza, como los del brécol, algunas conchas de moluscos o las espectaculares formas del romanescu.

En un principio fueron los amantes de las imágenes generadas por ordenador quienes se toparon con una serie de obstáculos técnicos para generalizar el conjunto de Mandelbrot a una dimensión más. Para obtener el fractal en dos dimensiones, hemos de considerar una red rectangular de, digamos, 1400 × 1000 puntos. Después, habremos de calcular con un programa adecuado si cada uno de estos 1,4 millones de puntos pertenece o no al conjunto de Mandelbrot. En caso afirmativo, se tiñe el píxel correspondiente de color negro; en caso contrario, se colorea de blanco o, como se hace a menudo, de algún otro color que proporcione más información sobre dicho cálculo (*véase el recuadro* «El conjunto de Mandelbrot: cómo colorear un fractal»).

Para aplicar ese principio a tres dimensiones, el rectángulo ha de transformarse en un paralelepípedo de, por ejemplo, 1400 × 1000 × 1000 puntos. Ahora el programa ha de responder 1400 millones de veces a la misma pregunta, por lo que necesita un tiempo de cálculo mil veces mayor que en el caso bidimensional. En un principio, ello supuso un impedimento técnico considerable. No obstante, desde entonces nuestros ordenadores se han vuelto mil veces más rápidos. ¿Basta ello para resolver el problema? Desgraciadamente, no. Aún hay que superar un obstáculo mucho más fundamental: la mera existencia del conjunto de Mandelbrot depende, de manera crucial, de cierta estructura algebraica de la que es posible dotar al plano, pero no al espacio tridimensional: el cuerpo de los números complejos.

Benoît Mandelbrot, el padre de la geometría fractal, falleció el pasado 14 de octubre. A lo largo de su vida realizó numerosas contribuciones a la teoría de sistemas complejos y su vasta gama de aplicaciones. Siempre será recordado por haber descubierto el fractal que hoy lleva su nombre. Muy pocas veces un resultado había hecho tan explícita para todos, expertos y no tanto, la belleza de la matemática.

«Mi vida parecía una serie de acontecimientos y accidentes. Sin embargo, al mirar atrás, veo un patrón.»

B. Mandelbrot en «A fractal life», entrevista en *New Scientist*, noviembre de 2004.

CONJUNTOS DE MANDELBROT GENERALIZADOS

Cada punto del plano puede asociarse con un número complejo. Eso implica que, tal y como estamos acostumbrados con los números ordinarios (reales), existen reglas para sumar, restar, multiplicar y dividir los puntos del plano. Una vez definidas estas operaciones de cálculo, la fórmula que permite construir el conjunto de Mandelbrot adopta una forma que seduce por su sencillez: $f(z) = z^2 + c$, donde z y c son números complejos. (Nótese que, para cada valor de c, f representa una función diferente.) Un punto c pertenece al conjunto de Mandelbrot si y solo si la sucesión formada por las iteraciones sucesivas 0, $f(0)$, $f(f(0))$, $f(f(f(0)))$, ... no diverge; es decir, si el módulo de los elementos de dicha sucesión no tiende a infinito.

¿Qué tiene de particular la función $f(z) = z^2 + c$? A primera vista resulta un tanto decepcionante, pues no parece tan especial: se trata de una sencilla función cuadrática. Para estudiar

EN SÍNTESIS

El conjunto de Mandelbrot, una de las creaciones más bellas de la geometría fractal, se obtiene a partir de una familia de funciones complejas. Ello implica que queda definido en dos dimensiones.

Durante años, se ha intentado generalizar la geometría de Mandelbrot a tres dimensiones. Sin embargo, el espacio tridimensional carece de una estructura algebraica adecuada que permita sumar y multiplicar puntos.

Hace algo más de un año se consiguió solucionar de manera parcial el problema. El *bulbo de Mandelbrot* constituye la primera generalización no trivial del conjunto clásico a tres dimensiones.

El conjunto de Mandelbrot: cómo colorear un fractal

Consideremos la familia de funciones complejas

$$f(z) = z^2 + c.$$

Para cada valor de c tenemos una función diferente. El *conjunto de Mandelbrot* se define como el conjunto de todos los puntos c del plano complejo para los cuales la sucesión infinita de iteraciones

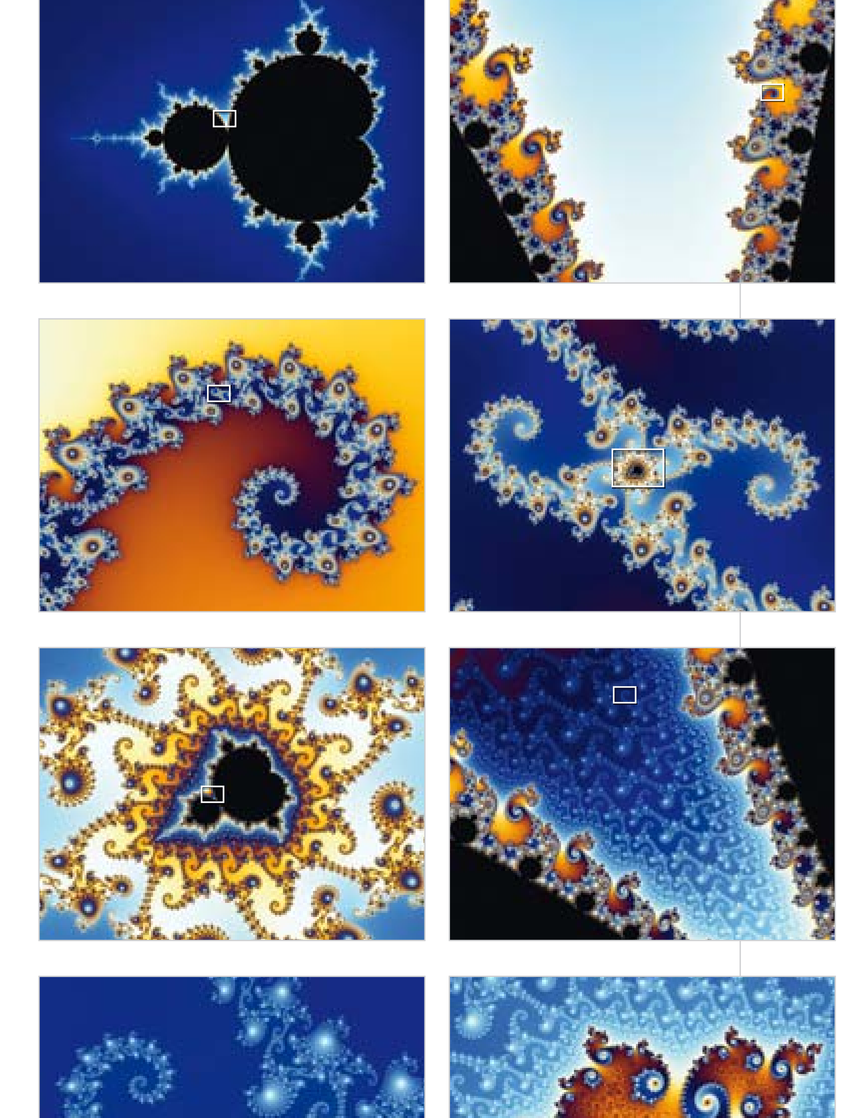
$$0, f(0), f(f(0)), f(f(f(0))), ...$$

no diverge (el módulo de sus términos no tiende a infinito). Para verificar si un punto c del plano pertenece o no al conjunto, en teoría habría que calcular los infinitos términos de la sucesión correspondiente para ver si esta diverge o no. Si lo hacemos y pintamos de negro los puntos que pertenecen al conjunto, el resultado se asemeja a la primera de las imágenes que reproducimos aquí.

En realidad, existe un atajo: basta con calcular hasta que un término de la sucesión se sitúe fuera de la circunferencia centrada en el origen y de radio 2. Puede demostrarse que, cuando eso sucede, la sucesión siempre diverge, por lo que en tal caso basta con detener el cálculo ahí. Eso ocurre en alguno de los primeros términos de la sucesión para aquellos puntos alejados del conjunto de Mandelbrot, pero tarda cada vez más conforme nos acercamos a su frontera.

En la práctica, se hace lo siguiente. Se establece un número máximo de términos que calcularemos en cada punto: por ejemplo, 1000 términos para cada valor de c. Si al llegar al término 1000 el resultado no ha escapado del círculo de radio 2, el punto c se declara como perteneciente al conjunto de Mandelbrot y se colorea de negro. En caso contrario, el punto se colorea según un código de color que indica en qué término de la sucesión se produjo el escape. De esta manera se calcularon las imágenes que reproducimos aquí, las cuales muestran ampliaciones sucesivas de la frontera del conjunto.

Esta técnica de coloración realza la geometría de la frontera y sirve para visualizar mejor sus infinitas ramificaciones. La sucesión correspondiente a un punto cercano a una de ellas diverge, pero lo hace tan tarde que su coloración anuncia la existencia de una ramificación. Podríamos pensar que esta manera de calcular sobreestima el conjunto de Mandelbrot, ya que puede asignar el color negro a puntos ajenos al conjunto, pero cuyas sucesiones correspondientes divergen mucho más tarde (en nuestro ejemplo, después del término 1000). En la práctica, predomina el efecto contrario: las ramitas más finas escapan a la criba y el conjunto es incluso más «peludo» de lo que parece.



WOLFGANG BEYER/WIKIMEDIA COMMONS

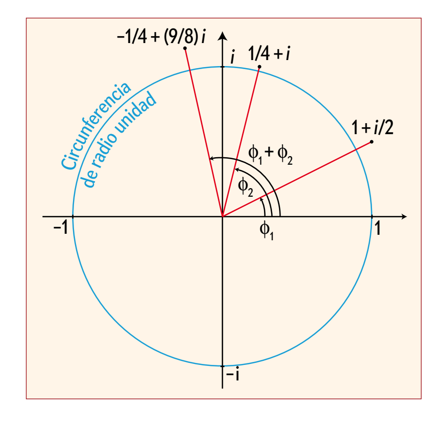
un fenómeno nuevo, los matemáticos suelen emplear el objeto más sencillo posible en el que se manifiestan sus propiedades. Las funciones más simples son las lineales: $f(z) = az + b$, pero estas no sirven para generar conjuntos de Mandelbrot. Si el parámetro a pertenece al interior de la circunferencia de radio unidad, todas las sucesiones tienden a cero; en caso contrario, todas divergen. Para obtener una geometría interesante, necesitamos una función que a veces aumente la distancia entre dos puntos y a veces la disminuya. Eso implica que la función no puede ser lineal. Las funciones no lineales más sencillas son aquellas de segundo grado, a las cuales pertenece justamente la familia de funciones $f(z) = z^2 + c$.

Existen otras funciones no lineales que también revelan nuevos e interesantes conjuntos de Mandelbrot. En lugar de la segunda potencia de z, podríamos emplear la tercera, la cuarta u otras. A partir de ellas, así como con la función exponencial y con muchas otras de las que dispone la caja de herramientas del análisis complejo, se pueden construir funciones iterativas

Multiplicación compleja

Un número complejo puede escribirse como $z = a + bi$, donde a y b son números reales e i denota la unidad imaginaria: $i^2 = -1$. Por tanto, z puede representarse como un punto del plano con coordenadas cartesianas (a, b). Su localización también puede describirse en coordenadas polares: en ellas, un punto queda descrito por su distancia r al origen, denominada módulo, y por el ángulo ϕ que subtienden el eje x positivo y la línea que une z con el origen (medido en el sentido antihorario).

En coordenadas polares, el resultado de multiplicar dos números complejos equivale a multiplicar sus módulos y sumar sus ángulos. Así, al elevar al cuadrado un número complejo, su módulo también se eleva al cuadrado y su ángulo se duplica. Si iteramos el proceso, un número situado en el exterior de la circunferencia de radio unidad se aleja hacia el infinito siguiendo una trayectoria en espiral; un número situado en el interior se acerca más y más al origen, y un número situado sobre la circunferencia permanece en ella y «salta» de un ángulo a otro.



El efecto de sumar una constante c a z^2 se aprecia mejor en coordenadas cartesianas: si p y q denotan las coordenadas cartesianas de c, z^2 se desplaza p unidades a lo largo del eje horizontal y q unidades a lo largo del vertical. Esta suma puede hacer que un punto interior a la circunferencia salga de ella o viceversa, en cuyo caso cambia el comportamiento (hacia el infinito o hacia el origen) de la siguiente operación de elevar al cuadrado. Es precisamente en esta propiedad donde reside el interés de las iteraciones sucesivas de la función $f(z) = z^2 + c$.

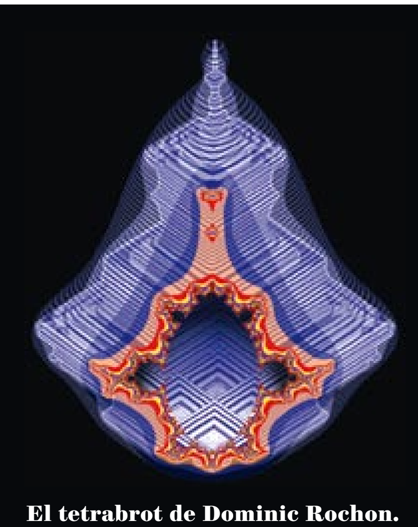
que producen imágenes sorprendentes. Sin embargo, al estudiar los detalles de su geometría, reaparece una y otra vez el conjunto de Mandelbrot clásico. Por lo visto, toda no linealidad resulta ser, en esencia, de segundo grado. Si damos la vuelta al argumento, podemos concluir que la función de iteración clásica ya incluye todas las propiedades fundamentales de las funciones no lineales.

Es por ello que los matemáticos cuentan con buenas razones para justificar su apego a la función cuadrática. Pero, dado que se trata de una función compleja, sus iteraciones sucesivas solo permiten obtener figuras bidimensionales. Para generalizar el procedimiento a tres dimensiones, habríamos de definir alguna regla para multiplicar un punto del espacio tridimensional consigo mismo, de tal manera que el resultado se correspondiese con otro punto del espacio. El producto vectorial, tan conocido por los físicos, no nos sirve, puesto que el producto de un vector consigo mismo arroja siempre cero como resultado.

Si se permiten cuatro en lugar de tres dimensiones, la multiplicación funciona un poco mejor. Para pasar de los números reales a los complejos (de una a dos dimensiones) se define un número nuevo a partir de cada par de números reales. Estos se convierten en la parte real y la parte imaginaria del número complejo. Después, se define la multiplicación para estas parejas de números reales. Mediante un proceso análogo, resulta posible construir pares de números complejos. Llegamos así a una nueva clase de números, los cuales pueden asociarse con los puntos del espacio tetradimensional, puesto que constan de cuatro componentes reales. Definir una multiplicación en dicho conjunto tampoco resulta fácil. El primer intento histórico llegó en el siglo XIX, cuando William Rowan Hamilton logró dotar a los elementos del conjunto de un álgebra particular. El resultado se conoce con el nombre de «cuaterniones». Su multiplicación no es conmutativa (en general, $a \cdot b$ difiere del producto $b \cdot a$), pero ello no introduce dificultades fundamentales a la hora de elevar al cuadrado (al calcular $a \cdot a$, el orden no importa).

Una vez que contamos con una regla para sumar y multiplicar números, ya podemos formular el análogo del conjunto de Mandelbrot en cuatro dimensiones. ¿Qué aspecto ofrece el resultado? No podemos saberlo, pues, como seres tridimensionales que somos, no poseemos la capacidad para visualizar un espacio de cuatro dimensiones. Lo que sí podemos estudiar es la geometría de una sección tridimensional de ese espacio de cuatro dimensiones. (De modo análogo a como el círculo, por ejemplo, aparece como una sección bidimensional de la esfera.) El resultado es más bien decepcionante: desde un cuerpo central salen proyectadas «ramas» y, al seccionarlas otra vez, la geometría que exhiben vuelve a ser el conjunto de Mandelbrot clásico. Bello, pero las propiedades fractales solo aparecen sobre el plano transversal a la rama, y no en su dirección longitudinal. Lo interesante de la geometría sigue condenado a manifestarse en dos dimensiones espaciales.

Dominic Rochon, de la Universidad de Québec en Trois-Rivières, ha hallado otra manera de definir una multiplicación para pares de números complejos. Es incluso conmutativa. No obstante, existen muchos números, además del cero, por los cuales no es posible dividir. Esta particularidad reduce la libertad de movimiento en ese espacio de cuatro dimensiones. Aunque Rochon no ideó sus «números bicomplejos» con el propósito de construir conjuntos de Mandelbrot generalizados, lo cierto es que la estrategia funciona y ofrece algunos resultados interesantes que han sido bautizados con el nombre de *tetrabrot*.

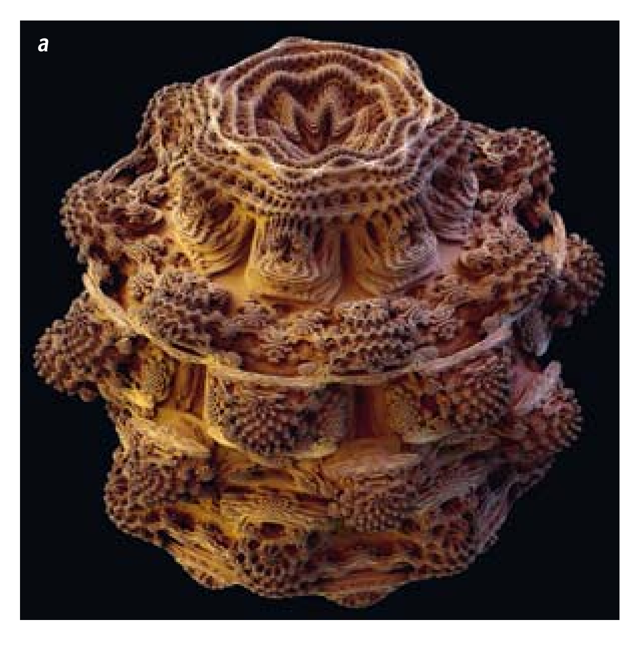


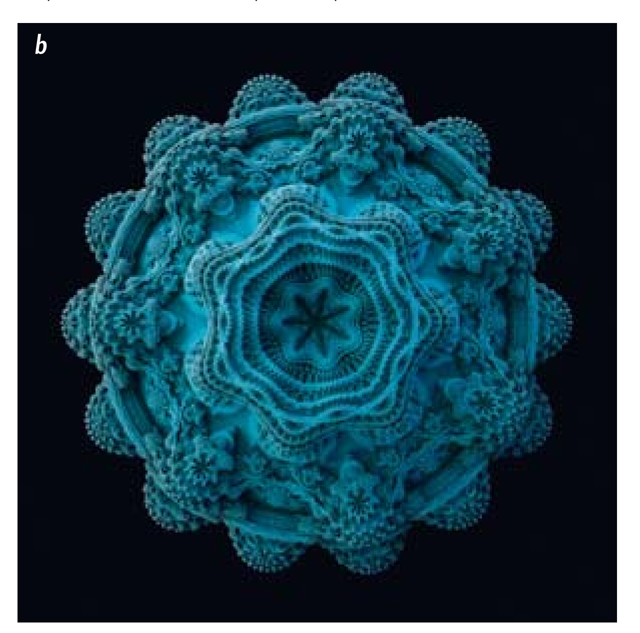
El tetrabrot de Dominic Rochon. Con sus estructuras cuadradas y angulosas, la figura recuerda a un cristal de bismuto. Sus secciones oblicuas muestran las formas familiares del conjunto de Mandelbrot clásico.

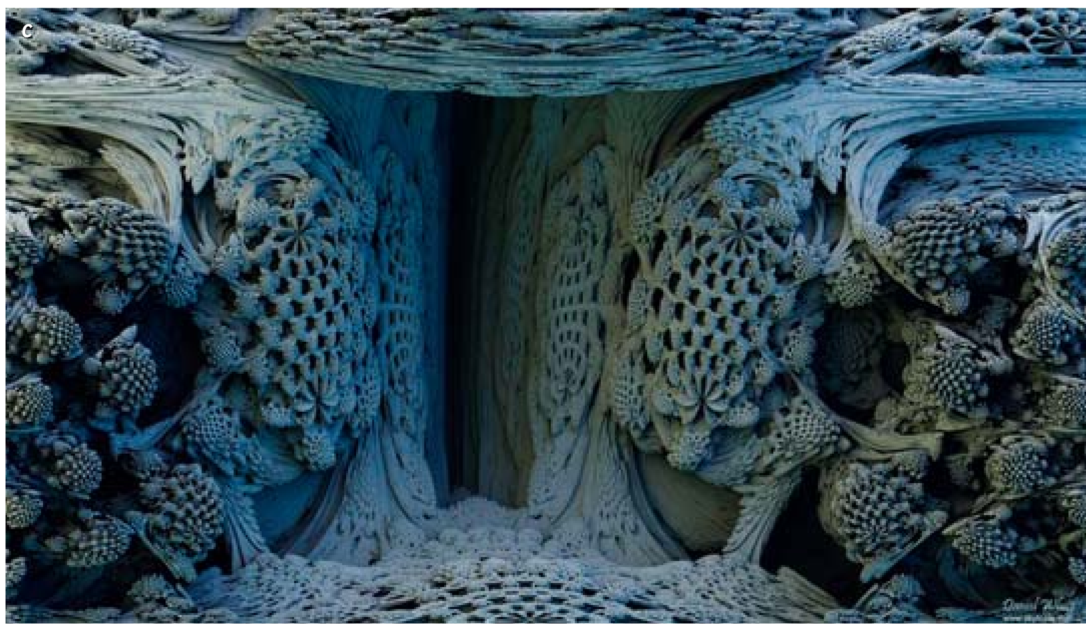
CHRISTOPH PÖPPE (*multiplicación compleja*); DOMINIC ROCHON/www.3dfractals.com (*tetrabrot*)

El bulbo de Mandelbrot

El bulbo de Mandelbrot (*a*) es la figura generada a partir de las iteraciones de la función $f(z) = z^8 + c$, donde *z* es un punto del espacio tridimensional y la «multiplicación» se define como una operación geométrica en coordenadas polares de manera muy similar a la multiplicación de números complejos. En estas imágenes generadas por Daniel White podemos apreciar que, observada desde arriba, la figura presenta una simetría rotacional de orden 7 (*b*). No es de extrañar, ya que los conjuntos de Mandelbrot clásicos generados por la función $f(z) = z^k + c$ exhiben una simetría de revolución de orden $(k - 1)$. En cambio, en las «inflorescencias» que brotan por todas partes se observa una simetría aproximada de orden ocho. Al igual que en el conjunto clásico, al ampliar los detalles de la superficie aparecen detalles nuevos (*c*).







DANIEL WHITE/www.skytopia.com/project/fractal/2mandelbulb.html

ÉXITO EN COORDENADAS POLARES

Quizá no sirva de mucho insistir en el punto de vista algebraico. Dado que hay que recurrir a una regla de multiplicación en dimensión cuatro que, además, exhibe algunas deficiencias, es posible que los resultados pasen por alto algunas de las propiedades más bellas del conjunto de Mandelbrot. En su lugar, quizás un punto de vista geométrico satisfaga nuestras expectativas.

Volvamos a la función $f(z) = z^2 + c$ en el plano complejo. ¿Qué ocurre cuando elevamos al cuadrado un número complejo? Al respecto, existen en el plano un punto y una semirrecta con propiedades especiales: el origen y el eje x positivo. Dado un número z, podemos localizarlo en el plano a partir de su módulo y de su ángulo polar: el módulo se corresponde con la distancia de z al origen, mientras que el ángulo polar es aquel que sub-



Sección transversal del bulbo: Al cortar el bulbo de Mandelbrot se recuperan las formas clásicas del conjunto bidimensional.



tienden el eje x positivo y la recta que une z con el origen. Cuando elevamos un número complejo al cuadrado, su módulo también se eleva al cuadrado y su ángulo polar se duplica. Por último, el efecto de sumar c al resultado se aprecia mejor en coordenadas cartesianas: equivale a desplazarlo p unidades a lo largo del eje horizontal y q unidades a lo largo del vertical, donde p y q se corresponden con las coordenadas cartesianas de c (*véase el recuadro* «Multiplicación compleja»).

La operación geométrica que acabamos de enunciar es la que puede generalizarse a tres dimensiones. Definamos en primer lugar nuestro sistema de coordenadas tomando la Tierra como ejemplo. Sea el centro de la Tierra el origen de coordenadas. Elijamos ahora dos ejes especiales: el primero, el que va del centro de la Tierra al Polo Norte; el segundo, el que une el centro de la Tierra con el punto de intersección entre el Ecuador y el meridiano de Greenwich. Esto nos permite localizar cada punto del espacio tridimensional a partir de su distancia al centro de la Tierra, su latitud y su longitud geográficas. Las dos últimas se corresponden con los ángulos con respecto a los ejes mencionados. (No debe preocuparnos que los geógrafos no localicen la latitud cero en el Polo Norte, sino en el Ecuador.)

¿Cómo se eleva al cuadrado un punto del espacio tridimensional? En analogía con el caso plano, definiremos la operación del siguiente modo: elevaremos al cuadrado su distancia al origen de coordenadas y duplicaremos sus dos ángulos polares. Volviendo al ejemplo de la Tierra, y si elegimos nuestra unidad de longitud igual al radio terrestre, veremos que nuestra operación de elevar al cuadrado exhibe las siguientes propiedades: los puntos situados por debajo de la superficie de la Tierra descienden aún más; los emplazados sobre ella se alejan hacia el cielo, y los que se encuentran en la superficie se desplazan sobre ella. Si, después de elevar al cuadrado, sumamos una constante c (tras definir la suma como la adición de las coordenadas cartesianas de z^2 y c), un punto podrá elevarse desde el subsuelo hacia el aire y viceversa. Todas estas propiedades son análogas a las que presenta la función cuadrática en dos dimensiones; por tanto, las iteraciones sucesivas de la función $f(z) = z^2 + c$ así definida en tres dimensiones quizá resulten tan interesantes como la original. Por semejanza con los números complejos (*complex numbers*, en inglés), los puntos del espacio tridimensional provistos de este producto han dado en llamarse *triplex numbers* (algo así como «números triplejos»).

Daniel White, Paul Nylander y otros han abierto la puerta a un campo que aún esconde muchos tesoros por descubrir. Entre ellos, el verdadero conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones... si es que existe

A Rudy Rucker, más conocido como autor de ciencia ficción, ya se le ocurrió la idea en 1988. Sin embargo, no consiguió generar las imágenes que de ella se derivaban, probablemente debido a la poca potencia de cálculo de los ordenadores de la época. Pero dos décadas después, en otoño de 2009, un grupo de programadores de todo el mundo, conectados a través del foro www.fractalforums.com/3d-fractal-generation, retomó la idea. En el transcurso de pocas semanas aparecieron algunas imágenes sorprendentes.

EL BULBO DE MANDELBROT

De manera independiente, el programador Daniel White había encontrado el mismo método «geométrico» para elevar al cuadrado y lo había implementado en un programa de ordenador con la función $f(z) = z^2 + c$. No obstante, los primeros resultados aún dejaban algo que desear. Algo más tarde, el matemático Paul Nylander tuvo la idea de modificar el exponente. Calcular z^3 quiere decir triplicar los ángulos y elevar al cubo la distancia al origen. El conjunto obtenido ya presentaba un aspecto más interesante. Tras una serie de experimentos, descubrieron que el exponente 8 generaba un verdadero ejemplar de exposición. Había nacido la mejor generalización hasta la fecha del conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones: el *Mandelbulb* o «bulbo de Mandelbrot» (*véase el recuadro* «El bulbo de Mandelbrot»).

Al estudiar con detalle la frontera del conjunto aparecen detalles cada vez más finos, como cabe esperar de un verdadero conjunto de Mandelbrot (*véase la ilustración a doble página que abre este artículo*). Además, al seccionar el bulbo de Mandelbrot a lo largo de un plano, se recuperan las estructuras familiares del conjunto clásico (*véase la portada de este número*). Sin embargo, llama la atención que el bulbo de Mandelbrot sea mucho menos «espinoso» que su pariente bidimensional. Incluso pueden encontrarse zonas lisas que, al parecer, no esconden detalles más sutiles. El resultado se asemeja a una nube de nata montada que alguien hubiese deformado mediante numerosas detonaciones pequeñas y, después, hubiese alisado aquí y allá con una espátula.

Quizá la suavidad en esos lugares se deba a deficiencias en el algoritmo que genera las imágenes, ya que recrear semejante estructura tridimensional en una pantalla reviste algunas dificultades. En primer lugar, casi ningún programador calcula todos y cada uno de los 1400 millones de puntos del paralelepípedo rectangular que mencionábamos al principio. (Krzysztof Marczak, quien programó la simulación de la imagen de portada de este número, sí lo hace; ello confiere a sus imágenes cualidades muy interesantes.) Además, colorear los puntos ajenos al conjunto quizá resulte contraproducente, pues el procedimiento podría ocultar otros detalles del bulbo.

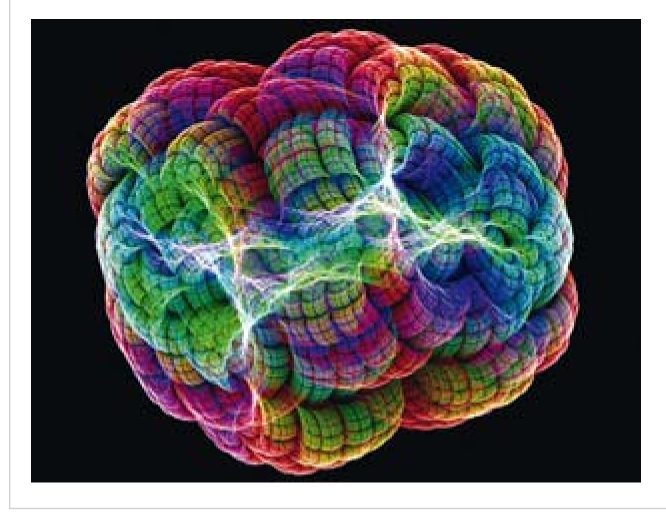
Para generar las imágenes se aplican los mismos procedimientos empleados en los videojuegos: desde el ojo del espectador, el

CONJUNTOS DE JULIA

Los ladrillos del conjunto de Mandelbrot

En realidad, el conjunto de Mandelbrot clásico puede entenderse como un catálogo de toda una familia de fractales: los conjuntos de Julia. Estos también se obtienen a partir de la misma función $f(z) = z^2 + c$. Solo que, esta vez, el parámetro c queda fijo y el conjunto de Julia se define como los valores de z para los cuales la sucesión de iteraciones cambia su comportamiento y se torna divergente.

Las mismas técnicas empleadas para definir el conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones también permiten generalizar la noción de conjuntos de Julia. Paul Nylander generó el conjunto de Julia de la función iterativa $f(z) = z^2 + c$ con el parámetro $c = (-0{,}2,\ 0{,}8,\ 0,\ 0)$ en el espacio tetradimensional de los «números bicomplejos» de Dominic Rochon (*izquierda*). De las cuatro coordenadas de cada punto del conjunto de Julia, tres se representan, la cuarta determina la coloración. Por su parte, el matemático Tom Beddard calculó el conjunto de Julia de la función iterativa $f(z) = z^{-13/2} + (1,\ 0,\ 0)$ en el espacio de los «números triplejos» que dan lugar al bulbo de Mandelbrot (*derecha*).





PAUL NYLANDER/www.bugman123.com/Hypercomplex (*conjunto de Julia en números bicomplejos*); TOM BEDDARD/www.subblue.com/blog/2009/12/13/mandelbulb (*conjunto de Julia en números triplejos*)

cual se supone situado en cierto lugar del espacio, se trazan líneas de visión según las trayectorias que seguirían los rayos de luz. Si una línea de visión acierta en la superficie del objeto, se colorea el punto correspondiente en la pantalla tal y como se vería el punto de la superficie. Este último recibe la luz de una fuente externa, y la cantidad de luz reflejada en dirección al ojo del observador depende de los ángulos de incidencia y de reflexión con respecto a la normal (perpendicular) a la superficie en dicho punto. Es aquí donde reside el problema: al tratarse de una superficie fractal, no existe un plano tangente ni, desde luego, un vector normal. En su lugar, ha de emplearse una definición aproximada que haga las veces de vector normal; parece probable que el procedimiento conduzca a una representación de la superficie más suave de lo que en realidad es.

Además, a lo largo de una línea de visión hay que calcular, paso a paso, el punto de intersección con el objeto. Para que el programa no pase detalles por alto, la línea ha de subdividirse en intervalos muy pequeños. Existen herramientas para evaluar la distancia al conjunto y controlar con precisión la longitud del paso. Esta función de estimación también proporciona el pseudovector normal mencionado antes. No obstante, ciertas filigranas de la superficie pueden escapar al algoritmo. Para determinar si un punto se encuentra «en la sombra», ha de comprobarse si otra parte del objeto impide el paso de la luz desde la fuente luminosa hacia el punto en cuestión. Para lograrlo, se hace uso de un procedimiento por pasos análogo al anterior.

Después de que se obtuvieron los primeros bulbos de Mandelbrot, afloró el instinto lúdico de los programadores. Si bien al modificar ligeramente las fórmulas correspondientes ya no es posible considerar la función de iteración como una generalización fidedigna del modelo clásico, las imágenes obtenidas también revisten interés.

Otros expertos recuerdan que, en realidad, el conjunto de Mandelbrot clásico tampoco es tan elemental. Más bien es un compendio, una especie de catálogo de toda una familia de fractales: los conjuntos de Julia. Estos también se obtienen a partir de la misma función $f(z) = z^2 + c$; solo que, esta vez, el parámetro c queda fijo y el conjunto de Julia se define como los valores de z para los cuales la sucesión de iteraciones cambia su comportamiento y se torna divergente. Con una familia de funciones iterativas se puede producir, en lugar de un conjunto de Mandelbrot, toda una serie de conjuntos de Julia. Estos también pueden generalizarse a tres dimensiones; los resultados son asombrosos (*véase el recuadro* «Los ladrillos del conjunto de Mandelbrot»).

¿Han hallado Daniel White, Paul Nylander y sus compañeros de profesión el equivalente tridimensional del conjunto de Mandelbrot? Ellos mismos lo creen poco probable. No es posible entender por qué justamente una definición de «multiplicación» un tanto arbitraria y con un 8 como exponente en la función iterativa habrían de dar como resultado la universalidad tan valorada de la función clásica. Pero han abierto la puerta a un campo nuevo y desconocido que aún esconde muchos tesoros por descubrir. Entre ellos, el verdadero conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones... si es que existe.

PARA SABER MÁS

Fractals for the classroom II: Complex systems and Mandelbrot set. H.-O. Peitgen, H. Jürgens y D. Saupe, Springer-Verlag, 1992.

Del azar benigno al azar salvaje. Benoît Mandelbrot en *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1996.

La geometría fractal de la naturaleza. Benoît Mandelbrot. Tusquets Editores, 1997.

Mandelbulb flight. Animación tridimensional de Krzysztof Marczak disponible en **www.youtube.com/watch?v=xO5fXGqeM5c**



FAUNA PREHISTÓRICA

Phoberomys, un gigante entre roedores

Un descubrimiento paleontológico en Venezuela permite conocer la morfología y hábitat de un roedor de grandes dimensiones

Inés Horovitz, Marcelo R. Sánchez-Villagra y Orangel A. Aguilera S.



La dieta de *Phoberomys pattersoni* debió de incluir gramíneas acuáticas.





Inés Horovitz, **Marcelo R. Sánchez-Villagra** y **Orangel A. Aguilera S.** son especialistas en biología evolutiva y paleontología de vertebrados. Horovitz es profesora de la Universidad de California en Los Ángeles e investigadora asociada del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Sánchez-Villagra es profesor de Paleontología en la Universidad de Zúrich. Aguilera es profesor de la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda en Coro, Venezuela, e investigador asociado del Instituto Smithsoniano de Investigaciones Tropicales.

EN SÍNTESIS

El descubrimiento de un esqueleto fósil casi completo de un roedor gigantesco que vivió en Venezuela hace entre unos 9 y 6 millones de años permitió calcular su peso corporal, de unos 700 kilogramos. El roedor, *Phoberomys pattersoni*, formó parte de la fauna de América del Sur que evolucionó cuando este subcontinente estaba separado de América del Norte y de otros continentes.

Los sedimentos donde se hallaron los restos de *P. pattersoni* indicaban que el ambiente en que vivió era costero, con lagunas. Otros fósiles descubiertos en la zona pertenecieron a organismos acuáticos, de manera que es posible que *P. pattersoni* pasara gran parte del día en el agua.

Convivió con otros gigantes, como cocodrilos del género *Purussaurus* y tortugas del género *Stupendemys*, de 11,5 metros y más de 3 metros de longitud, respectivamente. Puede que los cocodrilos se contaran entre sus depredadores.

Fósiles espectaculares de roedores descubiertos en Venezuela invitan a reconsiderar la evolución de este grupo de mamíferos. Los roedores más antiguos de América del Sur se han hallado en Chile; datan del Oligoceno temprano, hace unos 31,5 millones de años. Este fue el comienzo del registro de los caviomorfos, los roedores endémicos de América del Sur y de las Antillas. Sin embargo, no se sabe cuándo ni cómo llegaron los primeros roedores a este subcontinente, puesto que en esa época y durante la mayor parte del período Terciario, América del Sur estuvo separada de las otras masas continentales. Se especula que pudieron llegar en «islas flotantes» desde África, donde viven los parientes más cercanos de los caviomorfos.

El aislamiento de América del Sur tuvo una gran influencia en la evolución de su fauna. Salvo algunas excepciones (entre ellas, los roedores y los primates), no hubo intercambio faunístico con otros continentes hasta la elevación del istmo de Panamá. Durante el Terciario, muchos grupos de mamíferos que medraban en otros continentes no existían en América del Sur, y viceversa [*Véase* «Mamíferos desaparecidos de Sudamérica», por John J. Flynn *et al.*; Investigación y Ciencia, julio de 2007]. En numerosos casos, grupos de mamíferos muy distintos ocuparon nichos ecológicos equivalentes en diferentes partes del globo. Los caviomorfos tuvieron a su disposición una gama de nichos ecológicos en América del Sur distinta de la de otros roedores en otros continentes. En consecuencia, el grupo se diversificó en tamaño y forma, y aparecieron especies únicas en América del Sur que a menudo guardan semejanza con distintos mamíferos de los otros continentes. Este tipo de similitud que no conlleva parentesco es producto de una convergencia evolutiva.

El registro fósil de mamíferos de América del Sur es bastante desparejo en cobertura tanto geográfica como temporal. Gran parte de los fósiles provienen de la Patagonia. En esa zona se han descubierto fósiles de mamíferos en sedimentos del Oligoceno al Mioceno medio (de unos 34 a 10 millones de años de antigüedad). También se han hallado fósiles de ese grupo en el centro y norte de Argentina, pero de una edad distinta, que abarca del Mioceno tardío al Pleistoceno (de unos 9,4 millones de años a 10.000 años de antigüedad). Otros depósitos de gran importancia se ubican en la región septentrional del subcontinente, como los de La Venta, en Colombia, del Mioceno medio (de unos 13,5 a 11,6 millones de años de antigüedad). La fauna fósil de Colombia tiene poco en común con la del sur del subcontinente.

Se conocen al menos 160 especies vivientes y fósiles de caviomorfos. Algunas de ellas alcanzaron en el pasado grandes dimensiones en América del Sur y en las Antillas. La de mayor tamaño fue *Josephoratigasia monesi*, de la familia Dinomyi-



Localidad de Corralito, Urumaco (Venezuela). **La región de Urumaco presenta un clima semiárido: la precipitación raramente excede los 300 milímetros por año y la temperatura puede superar los 45 ºC. Es una planicie con pequeñas elevaciones y escasa vegetación, lo que facilita la búsqueda de los afloramientos fosilíferos de mayor concentración entre los diferentes estratos o niveles de sedimentación.**

FERNANDO ACOSTA

dae, una especie fósil de Uruguay de finales del Plioceno o principios del Pleistoceno que tal vez pesara unos 1000 kilogramos. Otras especies pertenecieron a la familia Neoepiblemidae, como *Phoberomys pattersoni*. Otro ejemplo de gigantismo es un representante de la familia caribeña Heptaxodontidae, *Amblyrrhiza inundata*, que medró en dos de las Antillas Menores, Anguilla y San Martín, durante el Cuaternario (hace unos 1,6 millones de años). Su peso corporal se ha estimado entre 50 y 200 kilogramos. Se desconoce la manera y el momento en que llegó *Amblyrrhiza* a estas islas, aunque otros miembros de la misma familia vivieron en la mayoría de las Antillas Mayores (Jamaica, La Española y Puerto Rico). Tampoco se sabe bien con qué otros roedores caviomorfos están emparentados los heptaxodóntidos.

PHOBEROMYS PATTERSONI

La especie de caviomorfos *Phoberomys pattersoni* vivió hace entre unos 9 y 6 millones de años (durante el Mioceno tardío). Ha atraído la curiosidad en todo el mundo por su extraordinario tamaño, cercano al de un búfalo de 700 kilogramos. El paleontólogo Álvaro Mones describió la especie en 1980 a partir de dientes molares aislados, no asociados a otros restos del esqueleto, hallados en la región de Urumaco, en el noroeste de Venezuela. De hecho, la identificación y filogenia de los roedores fósiles está basada sobre todo en la dentición (en el grupo al que pertenece *Phoberomys*, la forma y número de láminas de los molares son características diagnósticas importantes para reconocer las especies). Los escasos fósiles de roedores que se corresponden con otras partes del cuerpo son de particular interés en la descripción de otros aspectos de la paleobiología y evolución de estos animales.

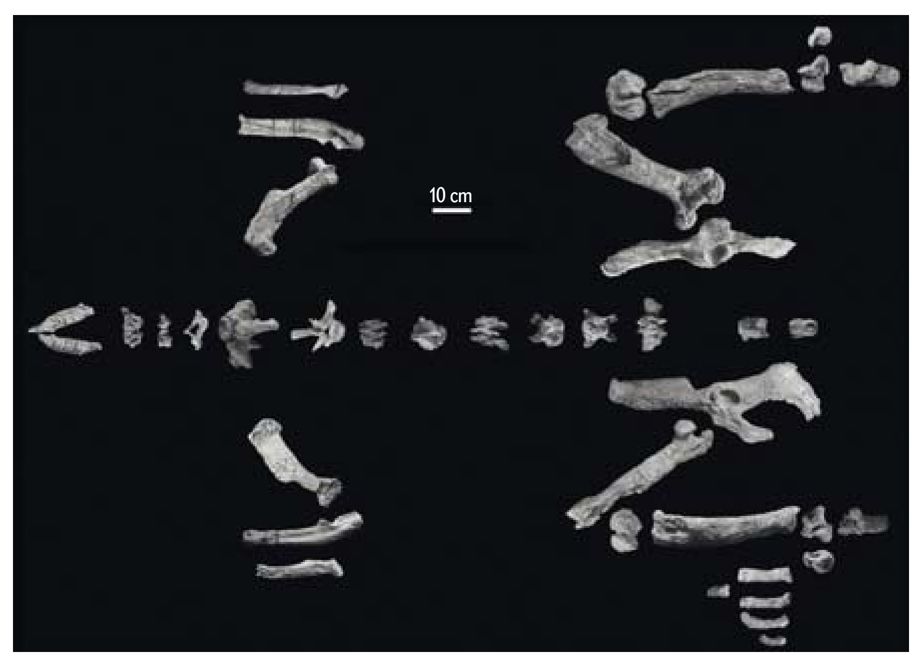
En el año 2000 se descubrió en Urumaco un esqueleto de *Phoberomys pattersoni*, el ejemplar más completo conocido de este género. Lo bautizamos con el sobrenombre de «Goya», por provenir de la localidad de Tío Gregorio (en esta región, a las personas llamadas Gregorio se les suele apodar «Goyo»). En 2003 publicamos los primeros resultados del estudio y, en la actualidad, el ejemplar se encuentra en las colecciones de la Universidad Francisco de Miranda en Coro, Venezuela. A partir del grado de desgaste de los dientes y el cierre de suturas del cráneo y del esqueleto poscraneano, dedujimos que este esqueleto correspondía a un individuo adulto.

Goya pertenecía a la familia de roedores fósiles Neoepiblemidae. Los parientes vivientes más cercanos de esta familia son las pacaranas (género *Dinomys*), roedores del tamaño de un zorro que se distribuyen desde Colombia y Venezuela hasta el norte de Bolivia. Las pacaranas tienen el aspecto de un conejillo de Indias, viven en zonas montañosas bajas y se alimentan de frutas, hojas y tallos tiernos.

La geología de la localidad donde se halló el esqueleto de Goya indica que el roedor vivió en un medio costero con lagunas. La fauna fósil del lugar era acuática, por lo que dedujimos que Goya presentaría hábitos semiacuáticos o, por lo menos, pasaría gran parte del día en el agua, lugar donde tal vez

buscaba alimento o se protegía de ciertos depredadores. La estructura de los dientes indica que la dieta de *Phoberomys pattersoni* era abrasiva (plantas cuya superficie se asemeja al papel de lija) y seguramente incluía gramíneas acuáticas.

No hemos identificado ningún tipo de registro geológico que permita explicar las causas de la extinción de Goya. En la época en que evolucionaron los animales fósiles de Urumaco, la fauna sudamericana era muy distinta de la que conocemos hoy en día. Cuando América del Sur se unió con América del Norte a través del istmo de Panamá, al final del Plioceno (hace unos 2,8 millones de años), hubo un gran intercambio de mamíferos entre ambos subcontinentes. No sabemos si en esa época aún existía *Phoberomys*, pero se especula que la llegada de las especies boreales fue la causa de la extinción de otros mamíferos sudamericanos coetáneos. Entre la fauna invasora se contaban especies herbívoras que, de haber coexistido con *Phoberomys pattersoni*, debieron competir por el mismo alimento. También llegaron algunos grandes depredadores, como los felinos, que quizás contribuyeran a la reducción de la población de *P. pattersoni*.



Esqueleto de *Phoberomys pattersoni* (apodado «Goya») hallado en Urumaco, localidad de Tío Gregorio, Venezuela.

EL GIGANTISMO DE *PHOBEROMYS*

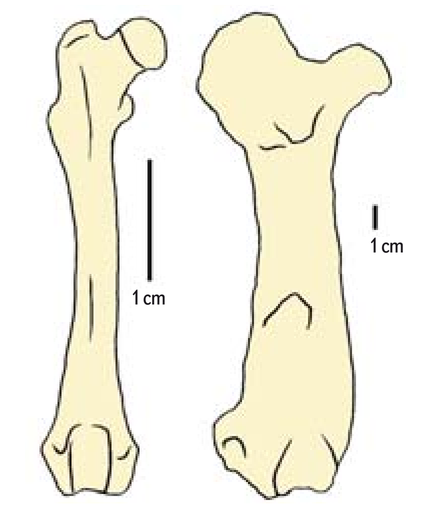
El parámetro más común que usan los biólogos y paleontólogos cuando se refieren al tamaño de los mamíferos es el peso corporal. En el caso de los fósiles, este se calcula a partir de la relación entre el tamaño de los huesos y el peso corporal de animales vivientes.

Se han desarrollado ecuaciones teniendo en cuenta las dimensiones de distintos elementos del esqueleto, como el cráneo, los dientes y los huesos de los miembros. En animales pequeños, el tamaño de un diente puede bastar para determinar con bastante acierto su peso, mientras que en animales más grandes se necesitan datos más estrechamente relacionados con el peso, como el grosor de los huesos de las extremidades.

El tamaño corporal es un factor muy importante en la estructura, fisiología y ecología de cualquier especie de mamífero. A medida que las dimensiones lineales de un animal o de algunas de sus estructuras aumentan, lo hacen también su área y volumen. Pero los tres parámetros no varían en la misma proporción. El área aumenta según una función cuadrada de las dimensiones lineales (L^2); el volumen, según una función cúbica (L^3). Pongamos por caso dos animales de formas idénticas pero con distintas dimensiones lineales: la longitud, anchura y altura del primero (X) miden el doble que las del segundo (Y). Si hiciéramos un corte transversal en ambos, la superficie de ese corte en el animal X sería cuatro veces superior a la del animal Y; pero el volumen de X sería ocho veces superior al de Y.

Uno de los factores físicos con consecuencias importantes en la estructura de un animal es la relación directa entre el peso corporal y el volumen. La solidez de sus patas depende de la superficie de un corte transversal de las mismas. Entonces, aunque el animal X pese ocho veces más que Y, su soporte estructural será solo cuatro veces superior. Es por ello por lo que las proporciones no se mantienen constantes en animales de distintos tamaños. Esa variación no proporcional de las dimensiones corporales se denomina alometría. A modo comparativo, si hiciéramos aumentar el tamaño del fémur de una ardilla de tierra hasta que alcanzara la longitud del fémur de Goya, veríamos que el fémur de la ardilla es mucho más delgado que el de *Phoberomys pattersoni* (Goya), lo que representa una adaptación de Goya para soportar su mayor peso corporal.

Esa relación de escala afecta, asimismo, a otros aspectos del cuerpo. Uno de ellos es el cerebro: las especies más grandes tienden a presentar más pliegues en la corteza cerebral que las especies pequeñas, de manera que la relación entre la superficie y el peso del órgano se mantiene más o menos constante. El metabolismo constituye otro aspecto íntimamente relacionado con el tamaño del animal: a menos superficie de piel en re-



Fémures del lado derecho de una ardilla de tierra (género *Spermophilus*, *izquierda*) y de Goya (*Phoberomys pattersoni*, *derecha*). Se representan con la misma longitud, manteniendo las proporciones originales, para poder apreciar fácilmente los grosores relativos: el fémur de Goya es en comparación mucho más grueso que el de la ardilla, lo que constituye una adaptación del caviomorfo para soportar su mayor peso corporal.

ORANGEL AGUILERA RODRIGUES

Un manjar para privilegiados

No hay pruebas directas de los depredadores de *Phoberomys pattersoni*, pero entre las especies fósiles halladas en Urumaco hay varias cuyo tamaño hace pensar que pudieron incluir semejante roedor en su dieta. Por lo pronto, había varios tipos de cocodrilos de enormes dimensiones, como *Purussaurus*, un género con especies que alcanzaron los 11,5 metros de longitud. Entre otros depredadores que posiblemente atacarían a individuos jóvenes (y, por ende, de tamaño corporal menor) se incluyen marsupiales carnívoros y aves forusrácidas. Estas últimas fueron un grupo de aves no voladoras que alcanzaron hasta 3 metros de altura y vivieron en América del Sur, aunque no se han hallado sus restos en Urumaco. En América del Sur, durante el Terciario no había mamíferos carnívoros (como los pumas y zorros), de manera que se supone que las aves forusrácidas llenaron de forma exclusiva el nicho ecológico de los carnívoros corredores hasta fines del Terciario, cuando aparecieron los marsupiales carnívoros corredores.

En una exploración realizada en 2004 identificamos los primeros restos de serpientes, compuestos por vértebras de al menos dos especies parientes de la boa. Esos ejemplares son demasiado pequeños como para considerarlos potenciales depredadores de individuos adultos de *Phoberomys pattersoni*, pero es razonable especular que otras especies de boas emparentadas, como las que medran hoy en día en la cuenca amazónica y orinoquia, habrían cazado un mamífero de más de 500 kilogramos de peso.



Cráneo y mandíbula del cocodrilo gigante *Purussaurus mirandai* hallado en Urumaco.

lación con el volumen, menos energía debe invertir el organismo para mantener constante la temperatura corporal. Por este motivo, los animales de mayor tamaño consumen menos energía y necesitan menos alimentos, en términos relativos, que los de menor tamaño.

Se conocen otras especies del género fósil *Phoberomys* en Argentina y Brasil, todas ellas de grandes dimensiones. La de mayor tamaño (*Phoberomys insolita*) se halló en Argentina: su tercer molar inferior medía unos 4,7 centímetros de longitud, 0,6 centímetros más que el de *P. pattersoni* (Goya). A pesar de su tamaño algo inferior, Goya ganó popularidad por tratarse de la única especie conocida con un esqueleto casi completo. Este hecho nos permitió estimar con mayor exactitud el peso corporal de *Phoberomys pattersoni* a partir del grosor de los huesos de sus extremidades, valor más estrechamente relacionado con el peso del animal que el tamaño de los dientes. Estimaciones previas a nuestro descubrimiento habían sobreestimado el tamaño de otros representantes del mismo género de roedores. Se había calculado que otra especie de *Phoberomys* (*P. burmeisteri*) poseía el tamaño de un rinoceronte, aunque en realidad, a juzgar por sus dientes, debía ser más pequeña que Goya.

Otro aspecto peculiar del esqueleto de Goya, además de su extraordinario tamaño, reside en la mayor robustez de los miembros posteriores con respecto a los anteriores. Creemos que los miembros posteriores desempeñaban una función más importante en la locomoción que los anteriores, mientras que estos últimos probablemente cumplían una función destacable en la manipulación del alimento.

LOS ROEDORES, MAMÍFEROS CON ÉXITO

Con alrededor de 2000 especies, los roedores representan casi la mitad de las especies actuales de mamíferos. Deben su éxito a su estrategia oportunista: poseen una gran capacidad reproductora y sus dietas son muy variadas. Se han adaptado a casi todos los ecosistemas de nuestro planeta, desde la tundra ártica hasta los desiertos más calurosos y secos. Los lemmings habitan en el Ártico y en invierno soportan temperaturas de hasta –30 ºC gracias a que se albergan bajo la nieve, donde la temperatura es algunos grados más elevada. En contraste, las ratas topo desnudas viven en algunas zonas de Etiopía, Somalia y Kenia, donde las temperaturas ascienden hasta los 60 ºC, ya que han aprendido a permanecer en sus cuevas, que se mantienen a unos 29 ºC.

Los roedores han evolucionado y han desarrollado formas muy variadas. Además de especies corredoras, saltadoras y trepadoras, existen especies con adaptaciones notables: las ardillas voladoras, que planean de un árbol a otro y casi nunca descienden al suelo; los tuco-tucos, que excavan sistemas de túneles complejos y viven la mayor parte del tiempo bajo tierra; y los coipos y los castores, animales semiacuáticos y excelentes nadadores. El grupo presenta, asimismo, una enorme diversidad de tamaños: las especies actuales más grandes son los carpinchos o capibaras, de América del Sur, con individuos que pesan unos 50 kilogramos (aunque el mayor peso registrado del animal ha sido de 105 kilogramos); las más pequeñas son los ratones espigueros de Europa y Asia, con unos 6 gramos de peso. En Europa, el roedor más grande es el castor, de unos 30 kilogramos.

La característica morfológica principal de los roedores que les distingue de otros mamíferos es su herramienta para roer, el par de incisivos largos y curvos en el maxilar y en la mandíbula. Esos dientes presentan un crecimiento continuo y están cubiertos de esmalte solo en su parte anterior. La acción de roer tiene como consecuencia el desgaste de las puntas de los incisivos; estas adquieren forma de cincel, porque la cara anterior, que tiene esmalte, se desgasta más despacio que el resto del diente. Al no poseer caninos, existe un espacio sin dientes, o diastema, que separa los incisivos de los premolares y molares.

ORANGEL AGUILERA RODRIGUES

Los roedores cumplen una función importante para el equilibrio de los ecosistemas. Se encargan de la dispersión de las esporas de muchos hongos subterráneos de los que dependen numerosas especies vegetales. Esos hongos se asocian a las raíces de las plantas y les ayudan a extraer agua y nutrientes del suelo. Por otra parte, los roedores representan la fuente de alimento de una variedad de carnívoros. Además, las especies que cavan cuevas y sistemas de túneles airean el terreno, y favorecen así a otros organismos. Aunque los humanos suelen provocar la extinción de especies animales cuando ocupan su hábitat, algunos roedores se han aprovechado de su presencia y han creado una asociación roedor-hombre desventajosa para el último. Los roedores causan grandes pérdidas anuales en cultivos y granos almacenados. Son también vectores de varias enfermedades, como la peste bubónica, transmitida por la rata común, que terminó con la vida de millones de personas en la Edad Media.

URUMACO, DIVERSIDAD FAUNÍSTICA NEOTROPICAL

La región de Urumaco de la que procede *Phoberomys pattersoni* alberga una enorme diversidad de formas extintas. Los fósiles más comunes comprenden dientes de tiburones, placas y aguijones de rayas, cráneos y otolitos de peces, carapachos de tortugas y esqueletos de cocodrilos. La mayoría de esas estructuras sirven como piezas diagnósticas para la identificación de las especies. Los mamíferos son muy escasos y hasta ahora solo se han descrito unas 20 especies en la región. Este hecho se atribuye a un posible sesgo en la preservación de los restos y no refleja la diversidad de mamíferos que debió existir. Por lo general, los fósiles se encuentran total o parcialmente expuestos a la intemperie, como estructuras aisladas y desarticuladas de gran fragilidad. Para evitar su deterioro en el momento de la excavación se procede a su tratamiento con productos consolidantes.



Uno de los ejemplares conocidos de la tortuga gigante *Stupendemys geographicus*, hallado en Urumaco en 1972 por una expedición de la Universidad de Harvard. Mide 2,2 metros de longitud (en la fotografía se observa su plastrón). Un ejemplar aún más grande, de 3,3 metros de largo, fue hallado en la década pasada por un equipo de la Universidad Francisco de Miranda de Venezuela.

La unidad geológica más importante portadora de vertebrados fósiles en esta región es la Formación Urumaco. Su edad geológica se ha estimado entre 9 y 6 millones de años, que se corresponde con el Mioceno Superior del período Terciario. La unidad se caracteriza por una diversidad faunística compleja asociada a ecosistemas marinos y costeros (lagunas costeras, marismas y litoral arenoso), dulceacuícolas (pantanos y ríos), estuarinos (deltas) y terrestres (sabanas). Cada uno de esos ambientes se reconoce por la acumulación de distintas capas de sedimentos. Se observan en la formación numerosos ejemplares fósiles de moluscos y peces marinos de aguas someras alternados con abundantes restos de cocodrilos, tortugas y bagres dulceacuícolas, propios de pantanales. También hay profusión de restos de bagres crucifijos y tiburones sierra, frecuentes en ambientes estuarinos y grandes ríos, cuyas aguas suelen remontar. Esta superposición de depósitos de sedimentos y fauna se corresponde con las sucesivas fases de sedimentación en el tiempo y en el espacio observadas en la Formación Urumaco.

A la notoria biodiversidad fósil de Urumaco contribuyen numerosas formas emparentadas con la fauna orinoquia-amazónica actual. Los fósiles de varios géneros de las familias de bagres (Pimelodidae y Doradidae), como la cachama *Piaractus* y la curvinata *Plagioscion*, la tortuga matamata *Chelus*, algunas especies de caimanes emparentadas con *Purussaurus* y mamíferos dulceacuícolas como los delfines de río, entre otros, constituyen testimonios claros de una fauna que persiste hoy en día en la cuenca del río Orinoco.

El encuentro de aguas dulces con el mar está registrado en las rocas de Urumaco. Se observa cómo las corrientes marinas y los sedimentos arrastrados por los ríos moldearon intrincadas dunas y barras arenosas. Se crearon así restingas y lagunas marginales muy propicias para la presencia de rayas, curvinas, bombaches, roncadores, varios géneros de tiburones, tortugas y vacas marinas o dugongos. También hay un importante grupo de bagres marinos hoy en día vinculados a la región del delta del Orinoco y del Amazonas, en particular, los bagres amarillos y múcuros.

Aparte de *Phoberomys pattersoni*, la fauna fósil de Urumaco comprende otras formas gigantescas, como el cocodrilo *Purussaurus mirandai*, de 11,5 metros de longitud, el gavial más grande del mundo, *Gryposuchus croizati*, de unos 10 metros de longitud y unos 1750 kilogramos de peso, y la tortuga más grande del mundo, *Stupendemys geographicus*, cuyo caparazón completo alcanzaba los 3,3 metros de largo. Las relaciones filogenéticas de esta tortuga todavía no se han podido establecer debido, en parte, a la ausencia de cráneos fósiles.

Dado que los cocodrilos gaviálidos se hallan en la actualidad restringidos al sur de Asia, su presencia en el Mioceno de Venezuela constituye otra incógnita aún por resolver. También lo es la extinción de grandes peces, reptiles y mamíferos que formaron parte de la fauna proto-orinoquia y proto-caribeña. Estos y otros interrogantes representan, sin duda, algunos de los retos interesantes que estimulan a la comunidad científica para tratar de entender la evolución de fauna terrestre, dulceacuícola y marina.

PARA SABER MÁS

The anatomy and paleobiology of the world's largest rodent, *Phoberomys pattersoni*, from the Upper Miocene of Northwestern Venezuela. Marcelo R. Sánchez-Villagra, Orangel Aguilera e Inés Horovitz en *Science*, vol. 301, págs. 1708-1710, septiembre 2003.

Tesoros paleontológicos de Venezuela. Urumaco, Patrimonio Natural de la Humanidad. Orangel A. Aguilera. Editorial Arte, Caracas, 2004.

Vertebrate fossils from the Venezuelan Neogene: Contributions on Neotropical Palaeontology. Dirigido por Marcelo R. Sánchez-Villagra y Andrew B. Smith en *Journal of Systematic Palaeontology*, vol. 4, fascículo 3, 2006.

Urumaco and Venezuelan paleontology: The fossil record of the Northern Neotropics. Dirigido por Marcelo R. Sánchez-Villagra, Orangel A. Aguilera y Alfredo A. Carlini. Indiana University Press. Bloomington, 2010.

Daniel I. Goldman es doctor en física por la Universidad de Texas en Austin y profesor en la Escuela de Física del Instituto de Tecnología de Georgia. Ha investigado la fluidización de medios granulares y la biomecánica de artrópodos y reptiles.

David L. Hu es doctor en matemáticas por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y profesor de ingeniería y biología mecánica en el Instituto de Tecnología de Georgia.



BIOFÍSICA

Biomecánica del serpenteo

Las ondulaciones de serpientes y lagartos dependen del entorno

Daniel I. Goldman y David L. Hu

El movimiento es fundamental para la supervivencia de los animales. Para buscar alimento, aparearse o huir, las anguilas nadan, los halcones vuelan, los topos excavan y las ardillas saltan. Las escalas implicadas en los procesos biofísicos responsables de la locomoción recorren varios órdenes de magnitud: incluyen procesos microscópicos (canales iónicos en fibras nerviosas que se despolarizan para enviar y recibir información), anatómicos (entre músculos, tendones y esqueleto) o de interacción entre el entorno y partes del cuerpo (como pies y manos, para generar una tracción efectiva).

Uno de los objetivos del estudio de los procesos locomotores consiste en describir sus principios generales mediante modelos aplicables a cualquier escala; una meta que requiere la colaboración de biólogos, físicos, matemáticos e ingenieros. Además, el estudio del movimiento en el reino animal ha inspirado el diseño de vehículos con una movilidad igual o incluso superior a la observada en los seres vivos.

Numerosos animales se mueven sin necesidad de usar las extremidades. Algunos lagartos, por ejemplo, renuncian a utilizar sus patas cuando se desplazan a través de céspedes densos o en terrenos arenosos; en su lugar, contonean el cuerpo. Para otras especies (como miles de serpientes, babosas, gusanos y algunos lagartos), las patas acabaron por resultar tan superfluas que desaparecieron hace millones de años. Sus cuerpos largos y flexibles les permiten atravesar grietas y recorrer largas distancias en entornos complejos y tortuosos, como las copas de los árboles, bajo tierra o el interior del tracto digestivo de otros organismos.

Mediante experimentos en el laboratorio y modelos sobre locomoción terrestre sin extremidades hemos aclarado los mecanismos de la locomoción ondulatoria en dos entornos distintos: los terrenos sobre los que se deslizan las serpientes (Hu) y en sustratos poco compactos, como las arenas en las que «nadan» los lagartos conocidos como peces de arena (Goldman). A continuación, explicaremos los principios generales que permiten a estos animales desplazarse a velocidades de varias veces su longitud corporal por segundo. Para ello, describiremos por separado el movimiento de las serpientes y de los peces de arena, con énfasis en la adaptación de estos reptiles a sus hábitats. A pesar de sus aparentes semejanzas, estos dos animales interaccionan de manera muy diferente con el entorno para desplazarse a través de él.

EN SÍNTESIS

Numerosos animales, como las serpientes, carecen de extremidades; Otros, como algunos lagartos, renuncian a usar sus patas para moverse en medios arenosos.

Las serpientes se benefician de una marcada anisotropía en el coeficiente de rozamiento de su vientre y de una redistribución del peso corporal para desplazarse con rapidez.

Al pez de arena, un lagarto del desierto que se desplaza bajo tierra, le basta con hacer ondular su cuerpo para convertir en «fluido» el medio granular de sus inmediaciones.

Las simulaciones numéricas modelizan la biofísica de estos reptiles y la compleja dinámica de los medios arenosos, cuyas propiedades basculan entre las de los sólidos y las de los fluidos.



SALVO INDICACIÓN CONTRARIA TODAS LAS IMÁGENES SON CORTESÍA DE LOS AUTORES. SARAH STEINMETZ, MATEO GARCÍA Y LIONEL LONDON (*serpiente*)/*AMERICAN SCIENTIST*

Serpientes y lagartos: **Aunque sus ondulaciones parecen similares, los movimientos de estos reptiles se rigen por mecanismos diferentes. Una serpiente del maíz (*Elaphe guttata*) se desplaza sobre una gelatina fotoelástica, la cual transmite luz allí donde el reptil aplica una presión mayor. En lugar de apoyarse de manera uniforme, la serpiente eleva algunas partes de su cuerpo para aumentar su velocidad y eficiencia. Una imagen de alta velocidad de un pez de arena (*Scincus scincus, inserto*) obtenida con rayos X revela que, para «nadar» bajo la arena, el animal no usa sus extremidades, sino que se impulsa mediante movimientos ondulatorios.**

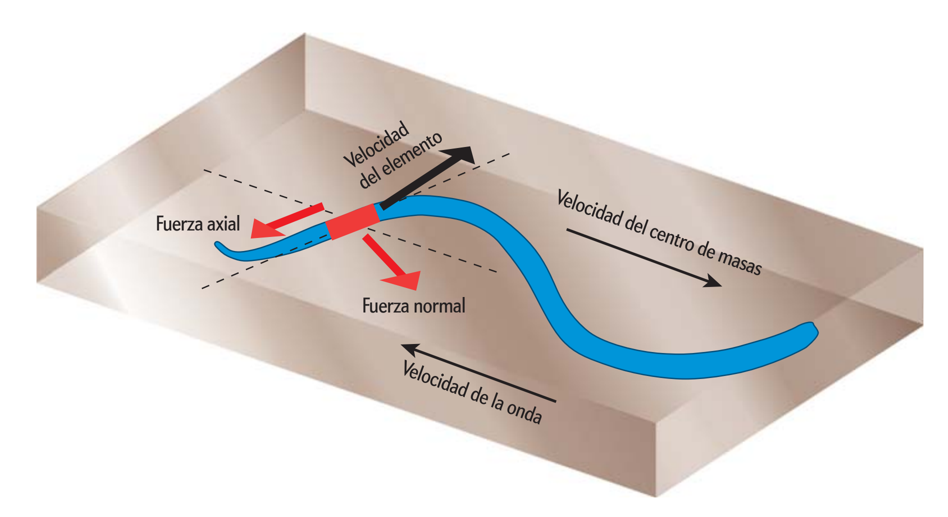
MODELOS DE MOVIMIENTO

Los aspectos comunes a nuestros respectivos modelos se derivan de la teoría conocida como técnica de la fuerza de rozamiento (TFR), desarrollada para estudiar el desplazamiento de pequeños organismos en un fluido. Consideremos una pequeña sección transversal cilíndrica de un reptil que ondula en un medio. Las fuerzas musculares que ejerce ese segmento, combinadas con la inercia del cuerpo, inducen en el medio una fuerza de reacción igual y contraria. Si el animal se mueve de un modo determinado, la suma de todas las fuerzas de reacción sobre su cuerpo pueden empujar hacia delante el centro de masas. Para simplificar el modelo, asumiremos que las ondulaciones tienen lugar en dos dimensiones. Ello nos permite descomponer la fuerza que actúa sobre el segmento en dos componentes, una tangencial y otra perpendicular a su superficie. Dichas fuerzas se denominan, respectivamente, axial y normal.

Para que el animal se desplace con movimientos ondulatorios, la suma de las componentes de las fuerzas normales que lo empujan hacia delante debe superar a la suma de las componentes de las fuerzas axiales que lo empujan hacia atrás. Para determinar si este es el caso, primero hemos de calcular las fuerzas de reacción del medio. De apariencia sencilla, la dificultad del método radica en que requiere una modelización adecuada del entorno.

En medios líquidos, como aquellos en los que se mueven los espermatozoides, los nematodos o las serpientes marinas, podemos emplear las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales en derivadas parciales emplean la segunda ley de Newton para describir el movimiento de un fluido en función de su presión y viscosidad. Si bien a menudo resultan imposibles de resolver de forma analítica, existen numerosos métodos aproximados para solucionarlas (como la ley de Stokes, aplicable a perturbaciones dominadas por la viscosidad).

Por su parte, los modelos de locomoción terrestre pueden resultar incluso más complejos. Aunque las fuerzas de rozamiento entre sólidos explica las interacciones entre algunas superficies, no existen ecuaciones que describan de manera adecuada la física de los lodos o arenas. En el caso más sencillo, la interacción entre dos superficies puede aproximarse mediante la fricción de Coulomb (aquella que estudian los alumnos de bachillerato). En tal caso, la fuerza de rozamiento es independiente de la velocidad, proporcional a la fuerza normal aplicada y contraria al sentido del movimiento. Sin embargo, un material



TFR: En los modelos basados en la técnica de la fuerza de rozamiento (TFR), el cuerpo se divide en elementos (*rojo*); estos generan un patrón sinusoidal que se desplaza desde la cabeza hasta la cola. Sus movimientos producen fuerzas de reacción, las cuales se dividen en una componente normal (perpendicular al elemento) y una axial (paralela). Para impulsar el cuerpo hacia delante, la suma de las fuerzas normales hacia delante debe superar a la suma de las fuerzas axiales hacia atrás.

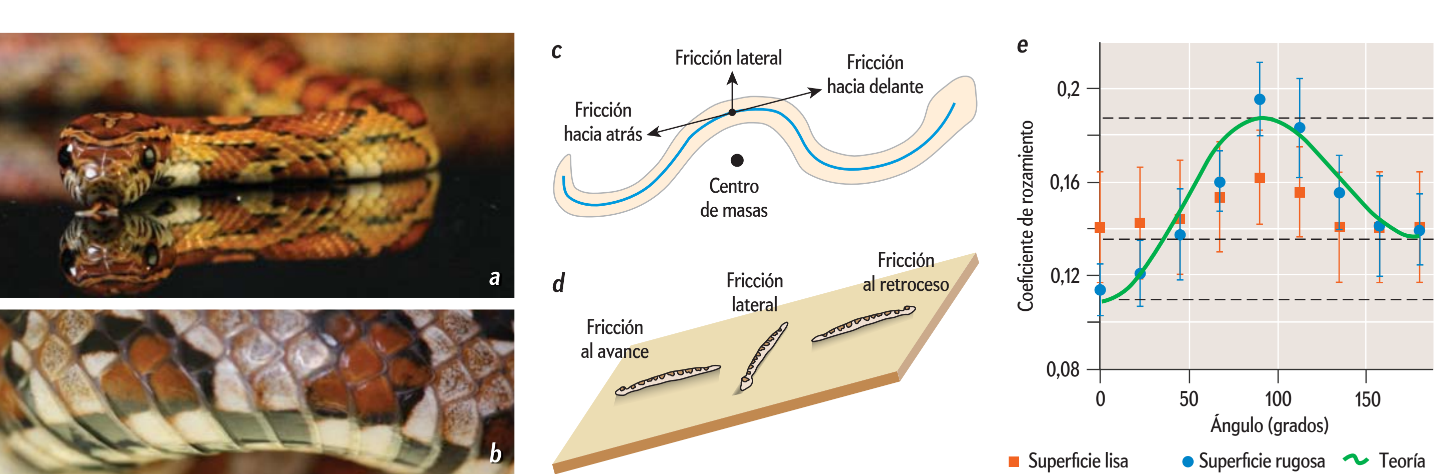
seco y granulado, como la arena, puede comportarse como un sólido o como un fluido. Ello dependerá de las tensiones aplicadas y de cuán compacto sea. Es más, el grado de compactación puede cambiar como respuesta a una perturbación; por tanto, la fricción en un medio granular (arrastre) depende de la historia de sus perturbaciones.

A pesar de todas esas diferencias entre medios, la locomoción por serpenteo parece operar con eficiencia en el agua, sobre terrenos lisos y, como nuestras investigaciones han demostrado, también en los materiales granulares. La locomoción ondulatoria en medios secos (sobre o bajo tierra) exhibe un rasgo importante que simplifica las ecuaciones: la inercia del organismo y la del medio se muestran despreciables en comparación con las fuerzas de fricción. De este modo, para detener su avance, el animal no tiene más que interrumpir el serpenteo. Por el contrario, si una gran serpiente de agua deja de ondular, aún avanzará cierta distancia que dependerá de su velocidad en el momento de suspender sus movimientos.

MECÁNICA SOBRE EL SUELO

A pesar de carecer de extremidades, las serpientes y algunos lagartos sin patas gozan de una magnífica adaptación al entorno. Su evolución ha dado lugar a especies cuyo tamaño abarca hasta tres órdenes de magnitud; desde las pequeñas serpientes hilo, de escasos centímetros, a las grandes anacondas de diez metros. Todas ellas poseen el mismo diseño básico: un tubo flexible de músculo recubierto de escamas. Ello les confiere una versatilidad enorme: pueden ascender por el tronco de un árbol, reptar sobre tierra o nadar en el agua sin modificar sus mecanismos motores. La cantidad de energía que requieren para desplazarse sobre el suelo es equiparable a la que necesita un organismo de su mismo peso dotado de extremidades. Algunas, como la mamba negra de dos metros, pueden acelerar hasta alcanzar la misma velocidad con la que corre un humano (unos cinco metros por segundo).

Uno de nosotros (Hu), junto a Michael Shelley, de la Universidad de Nueva York, investigó en 2009 la locomoción de la culebra real coralillo (*Lampropeltis triangulum*) y de la serpiente del maíz (*Elaphe guttata*), dada su habilidad para reptar en medios como praderas o pendientes rocosas. Como todas las serpientes, estas especies también cuentan con diferentes modos de desplazamiento. El más común, la ondulación lateral, se ha descrito a partir de los puntos de apoyo: las serpientes empujan sus flancos en dirección lateral contra rocas y ramas cercanas. En consecuencia, los experimentos anteriores habían estudiado el desplazamiento de estos reptiles en tableros con pequeños salientes. Las serpientes logran desplazarse gracias a que la combinación de sus fuerzas musculares sobre los salientes supera a la fuerza de fricción en su vientre. Sin embargo, las serpientes también avanzan con facilidad sobre terrenos poco



Física de las escamas: La piel de las serpientes es suave y resistente a la abrasión, lo que les permite deslizarse con facilidad (*a*). Las escamas de su vientre se asemejan a tejas que solapan unas con otras (*b*) y pueden engancharse en las pequeñas irregularidades del terreno. La fricción que experimenta el reptil depende de la dirección de movimiento (*c*). El coeficiente de rozamiento se mide tras anestesiar al animal durante unos momentos y situarlo sobre un plano inclinado cubierto con distintos materiales (*d*). Sobre superficies suaves, las serpientes se deslizan fácilmente en cualquier dirección; sobre suelos rugosos, las escamas se oponen al movimiento, lo que favorece el desplazamiento hacia delante (*e*).

accidentados, como arenas o rocas desnudas, que no presentan puntos de apoyo obvios. El objetivo de nuestros experimentos era entender lo que ocurría en tales condiciones; en parte, dada la relativa facilidad con que el rozamiento podía incorporarse en nuestros modelos matemáticos.

La fricción es una fuerza que se opone al deslizamiento de un objeto sobre otro, como al de las suelas de nuestros zapatos sobre el suelo. Dicha fuerza tiene su origen en que ninguna superficie es completamente plana: la observación con el microscopio revela la presencia de diminutos picos y valles, o asperezas, que se enganchan y se deforman bajo la presión de otra superficie. La resistencia al deslizamiento se describe mediante el coeficiente de rozamiento, definido como el cociente entre la fuerza de fricción resultante entre dos superficies y la fuerza compresiva aplicada. Así, la fuerza mínima que debe ejercer una serpiente para desplazarse sobre un suelo horizontal (la misma necesaria para arrastrar a una serpiente dormida) debe superar al producto del coeficiente de rozamiento y su propio peso.

Aunque las escamas dorsales, con forma de diamante, encajan unas con otras para recubrir la superficie del animal, las de su vientre se solapan a modo de tejas. De esta manera se enganchan al terreno cuando el reptil se desliza hacia los lados o hacia atrás. Esta orientación dota a las serpientes de una propiedad muy útil, producto de la fricción: sobre ciertos sustratos, las escamas ventrales adoptan una dirección de deslizamiento preferente. Tras dormir durante algunos minutos a nuestras serpientes y estirar su cuerpo en varias orientaciones sobre un plano inclinado, medimos su coeficiente de rozamiento como función de la orientación corporal. Las mediciones se efectuaron sobre una tela cuyas rugosidades exhibían una longitud característica (0,2 milímetros) equiparable al grosor de las escamas (0,1 milímetros), lo que permitía que se enganchasen a la tela. Los experimentos con culebras real coralillo mostraron que el coeficiente de rozamiento era bajo cuando la serpiente se deslizaba hacia delante (0,10), intermedio cuando lo hacía hacia atrás (0,14) y mayor cuando el animal se desplazaba de lado (0,20). Sin dicha anisotropía, las serpientes nunca lograrían avanzar sobre una superficie plana.

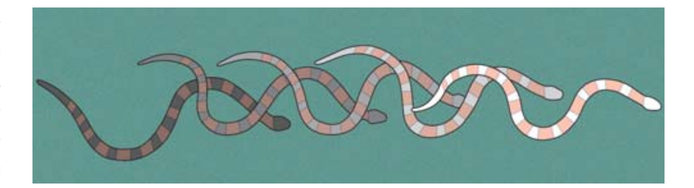
La importancia de las escamas para la locomoción queda patente cuando vestimos a las serpientes con una «chaqueta isotrópica» (una funda de tela que, sin impedir la respiración, se ajusta al cuerpo del reptil). En una serpiente enfundada, el rozamiento también se opone al deslizamiento del animal sobre el suelo y genera fuerzas en las direcciones normal y axial a su vientre. Sin embargo, la magnitud de dichas fuerzas es la misma en todas direcciones. Cuando la serpiente efectúa un movimiento ondulatorio, la suma de las fuerzas sobre el centro de masas del animal es cero y este serpentea sin desplazarse, como si se hallase sobre una superficie de hielo. El mismo efecto se consigue al colocar a la serpiente sobre materiales muy suaves, como el plástico. En tales situaciones, el reptil no avanza a no ser que levante su cuerpo mientras repta o adopte otro modo de desplazamiento (como el desplazamiento lateral o el movimiento en concertina, en el que la serpiente se pliega sobre sí misma a modo de acordeón).

En nuestro modelo empleamos las propiedades de las escamas para determinar la velocidad estacionaria del centro de masas del animal. Los datos que requiere el modelo son los coeficientes de rozamiento ventral y las características cinemáticas del movimiento ondulatorio de la serpiente (frecuencia, longitud de onda y amplitud). Además, asumimos que el peso del reptil se distribuía de manera uniforme a lo largo de su cuerpo. Nos sorprendimos al encontrar que la velocidad de la serpiente de nuestro modelo era la mitad que la alcanzada por una serpiente real (8 centímetros por segundo, o 0,2 veces su longitud corporal por segundo).

Con anterioridad, otros investigadores habían observado que, al avanzar, las serpientes elevan algunas partes de su cuerpo. Con ello su peso se redistribuye, ya que se concentra en los puntos que quedan en contacto con el suelo. Esta técnica de desplazamiento queda patente, sobre todo, en el modo de desplazamiento lateral, pues la huella que el animal deja sobre la arena se asemeja más a pisadas individuales que a un sendero continuo. Tras experimentar con serpientes colocadas sobre un espejo o sobre gelatina fotoelástica (un material que transmite la luz solo cuando se comprime), pudimos comprobar que las serpientes alzan partes de su cuerpo también cuando avanzan.

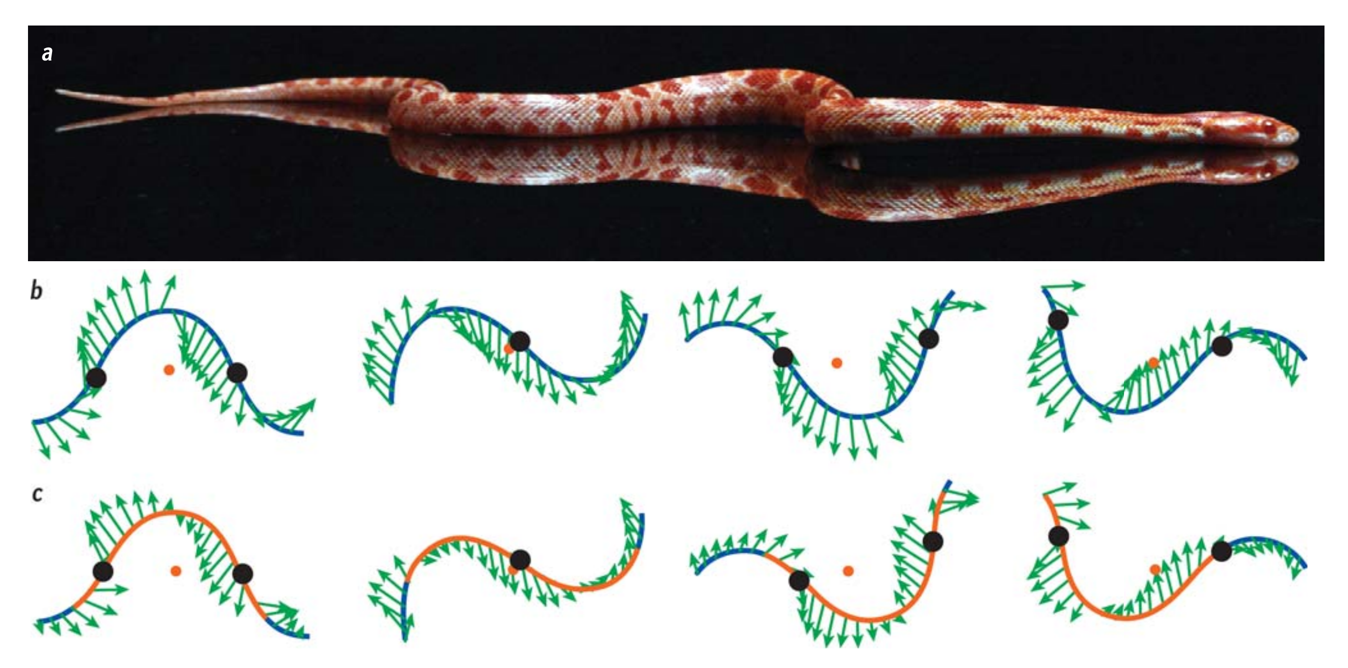


Serpiente enfundada: La importancia de las escamas para el desplazamiento de las serpientes se pone de manifiesto cuando vestimos al reptil con una «chaqueta isotrópica», la cual evita el contacto entre las escamas y el suelo. Cuando la serpiente trata de deslizarse, la fricción no depende de la dirección de movimiento. La resultante de las fuerzas es nula y el animal serpentea en el sitio sin avanzar.





Rozamiento: El dibujo muestra una superposición de imágenes del movimiento ondulatorio de una serpiente sobre una superficie rugosa (*arriba*) y otra suave (*abajo*). En ambos casos, la serpiente genera ondas de amplitud, longitud de onda y frecuencia constantes. Sin embargo, solo sobre la superficie rugosa las fuerzas de fricción generan un movimiento hacia delante.



Pasos de serpiente: **Una serpiente del maíz se ha colocado sobre un espejo (*a*) para observar la elevación de algunas partes de su cuerpo. Los modelos usan las propiedades de las fuerzas de fricción y la cinemática de su onda corporal para calcular las fuerzas propulsoras con una distribución de peso uniforme (*b*) y variable (*c*). La figura muestra la orientación del cuerpo de la serpiente (*azul*) y la posición de su centro de masas (*puntos naranjas*), así como la dirección y magnitud de las fuerzas de fricción ejercidas por el suelo sobre la serpiente (*verde*) cuando esta se desplaza de izquierda a derecha. Las flechas que no siguen el sentido de avance indican energía malgastada. Abajo, se han marcado las secciones (*naranja*) cuyo peso es mayor que la fuerza normal ejercida sobre ellas. En los puntos de inflexión (*negro*), la elevación de algunas partes del cuerpo incrementa el empuje hacia delante.**

Nuestro modelo demostró que dicha redistribución del peso corporal aumenta la velocidad en un 35 por ciento y la eficiencia en un 50 por ciento. ¿A qué obedece un beneficio tan grande? La energía motriz se desperdicia en aquellas zonas en las que la fricción (las fuerzas propulsoras) es perpendicular a la dirección de avance. Dado que la fuerza de rozamiento es proporcional al peso aplicado, la serpiente genera un empuje mayor si eleva su cuerpo en esas regiones y aumenta el peso en otras. Por tanto, el serpenteo comparte rasgos con nuestra manera de andar: cuando caminamos, transferimos el peso desde el pie atrasado al adelantado; para ello, levantamos el pie en lugar de arrastrarlo. De manera similar, una serpiente levanta las partes de su cuerpo que realizan el trabajo menos útil. Esperamos que un estudio más detallado de esta técnica de desplazamiento nos permita comprender los mecanismos de las serpientes más veloces, como la mamba negra.

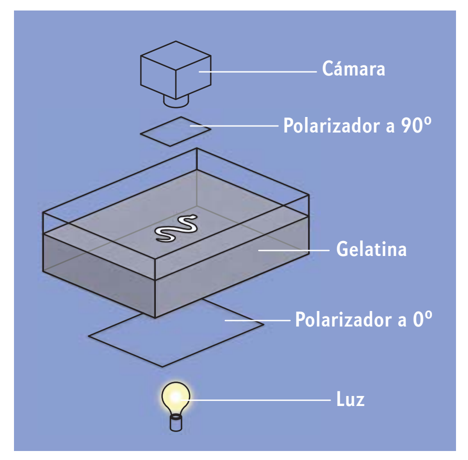
MECANISMOS BAJO TIERRA

Muchos animales del desierto, como serpientes, topos, lagartos y escorpiones, desaparecen bajo la arena para protegerse de los depredadores y del calor o para cazar. El pez de arena, un lagarto del desierto de unos 10 centímetros de longitud, posee dedos aserrados en sus cuatro extremidades, un morro con forma de pala, y vientre y flancos aplanados. Todos estos rasgos posiblemente facilitan su inmersión y natación en la arena. Como en el caso de las serpientes, sus escamas son suaves y resistentes a la abrasión, si bien las de su vientre no se solapan unas sobre otras. Aunque se han propuesto numerosas hipótesis acerca del movimiento de estos animales, la investigación de uno de nosotros (Goldman) fue la primera que estudió en detalle su cinemática. Se trata de un objetivo complicado, dada la dificultad que supone observar al animal bajo tierra.

El pez de arena usa sus extremidades para avanzar con rapidez sobre la superficie. Pero, cuando se asusta, apunta su hocico hacia abajo y desaparece bajo la arena en tan solo medio segundo. La física de las fuerzas propulsoras en un medio granular se diferencia en gran medida de las fuerzas de fricción que rigen el serpenteo sobre superficies sólidas, ya que los materiales como la arena pueden ceder (fluir) o «solidificarse» en respuesta a las perturbaciones.

La arena del desierto se caracteriza por su sequedad. Se compone de partículas aproximadamente esféricas de entre 0,1 y 0,3 milímetros de diámetro, que solo interaccionan por contacto a través de fuerzas disipativas (como la viscoelasticidad, la deformación plástica y la fricción). Según sea la tensión aplicada, un medio granular exhibe un abanico de comportamientos que abarca rasgos propios de los gases, los líquidos o los sólidos. Un montón de granos sobre una tabla plana se comporta como un líquido en el límite de fluencia: actúa como un sólido para ángulos de inclinación pequeños, pero, para ángulos mayores, su respuesta pasa a ser la de un fluido y se desliza hacia abajo. Las leyes mecánicas que gobiernan estos materiales no se comprenden tan bien como las relativas a líquidos o gases.

El comportamiento de los medios granulares depende en gran medida de las condiciones en que se encuentre. Uno de nosotros (Goldman) ha investigado la manera en que el coeficiente de empaquetamiento (el cociente entre la suma de los volúmenes de los granos individuales y el volumen ocupado por el conjunto) controla la respuesta del material a una perturbación mantenida en el tiempo, como el movimiento de un objeto a través de la arena. Aunque en un medio de granos secos y esféricos dicho coeficiente no varía demasiado (entre el 58 y el 63 por ciento), esos cambios modifican de manera considerable su comportamiento.







Huellas luminosas: Es difícil observar la manera en que una serpiente redistribuye su peso a medida que se desliza, ya que su cuerpo se halla siempre muy cercano al suelo. Un método consiste en emplear una gelatina fotoelástica, iluminada desde abajo y entre filtros polarizadores perpendiculares (*izquierda*). La orientación de los filtros bloquea la luz polarizada. Sin embargo, cuando la serpiente presiona la superficie, rota el plano de polarización de la luz y esta es detectada por la cámara (*centro* y *derecha*). Aunque una superficie gelatinosa puede interferir en los movimientos naturales del animal, los resultados sugieren que no todo el cuerpo de la serpiente se halla en contacto permanente con el suelo.

Una colección de granos poco compacta guarda semejanzas con un fluido y responde con suavidad a las perturbaciones. Debido a la existencia de espacios libres, las partículas desplazadas se reubican sin aumentar el volumen del conjunto. En cambio, en una arena muy empaquetada, la fuerza de arrastre se ve casi doblada y los granos fluyen de manera abrupta y desordenada. Algunos grupos de partículas se expanden y aumentan el volumen del conjunto (dilatación). En medios fluidos, como el agua, la resistencia al avance que experimenta un cuerpo aumenta con la velocidad de este. En cambio, en un medio granular y a velocidades bajas, las fuerzas sobre los objetos son aproximadamente independientes de la velocidad, ya que dominan las fuerzas de fricción.

Modelizar un comportamiento semejante tiene sus dificultades. Si bien se han conseguido progresos notables a la hora de describir los estados de «tipo gas» de los medios granulares agitados, las leyes de arrastre no pueden aplicarse en casos en los que coexisten comportamientos de tipo sólido y de tipo líquido. Un tratamiento adecuado requiere un método de «fuerza bruta»: dejar que un ordenador calcule el movimiento y la interacción de millones de granos sujetos a los efectos de las colisiones y la gravedad. Dicho procedimiento se conoce como dinámica molecular. Una vez validados, estos modelos nos ayudan a comprender los flujos de partículas como si de un microscopio virtual se tratase.

UN ENTIERRO RÁPIDO

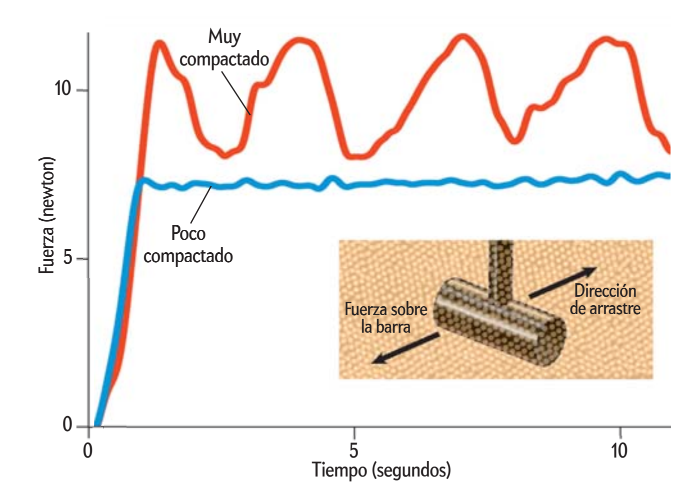
El movimiento de un pez de arena bajo tierra resulta fascinante. ¿Usa el animal sus extremidades para remar, ondula como una anguila o hace ambas cosas? Una vez su cabeza se introduce en el medio, ¿sigue este comportándose como un fluido o se «solidifica» con tanta rapidez que los movimientos del animal deben devolverlo al «estado líquido»? ¿Se modifican los movimientos del pez de arena en respuesta a los cambios en el empaquetamiento del material? Para responder a estas preguntas, Ryan Maladen, uno de los estudiantes de Goldman, empleó una serie de técnicas con rayos X para observar el movimiento del pez de arena bajo la superficie.







Nadar en seco: El pez de arena, un lagarto natural de los desiertos del norte de África, usa su hocico con forma de pala, su piel suave y su cuerpo para ondular a través de la arena a velocidades que alcanzan dos longitudes corporales por segundo. El reptil, de unos 10 centímetros, logra enterrarse en menos de un segundo. Para desplazarse sobre la superficie usa sus extremidades. Sin embargo, una vez bajo tierra, pega sus patas al cuerpo y avanza con movimientos ondulatorios.



Empaquetamiento: La fuerza de arrastre sobre una pequeña barra en función del tiempo muestra la diferencia entre un medio granular poco compacto (*azul*) y uno muy empaquetado (*rojo*). En un medio con partículas poco apretadas, un flujo suave implica que, tras un incremento inicial, la fuerza se mantiene constante. En una arena más compacta, el arrastre oscila; el material cercano a la barra cede periódicamente y un bloque de arena es empujado hacia arriba. En el experimento, la barra (*inserto*) medía 2 centímetros de largo y se desplazaba a una velocidad de 1 centímetro por segundo; las partículas eran cuentas de cristal de 0,3 milímetros.

Para controlar las propiedades de la arena usamos un lecho artificial de fluidez controlable. Esto se consigue gracias a un flujo de aire que empuja hacia arriba una colección de granos sobre un fondo poroso. Por debajo de un determinado flujo crítico, los granos mantienen sus propiedades de sólido; pero, por encima de ese valor, la arena adquiere las propiedades de un fluido. Así, el aparato permite crear de manera controlada estados con diferente empaquetamiento.

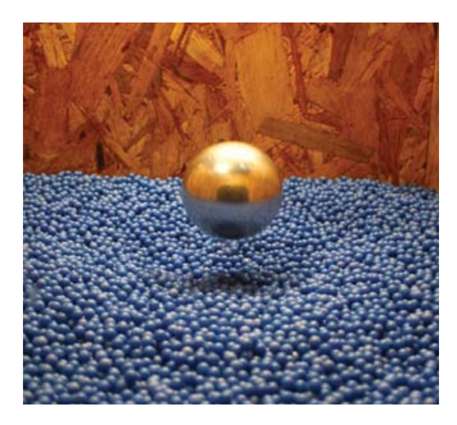
El pez de arena se emplaza en el interior de un redil comunicado con el lecho artificial a través de una puerta. En cuanto esta se abre, escapa del redil y se introduce en la arena. Un vídeo de alta velocidad revela que el animal usa sus extremidades y también su cuerpo para enterrarse. El tiempo que dura la inmersión es muy breve y no depende del grado de empaquetamiento de la arena.

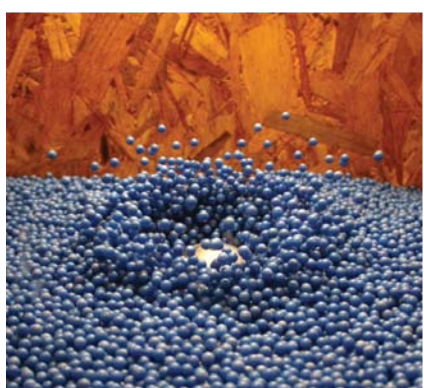
NADAR EN LA ARENA

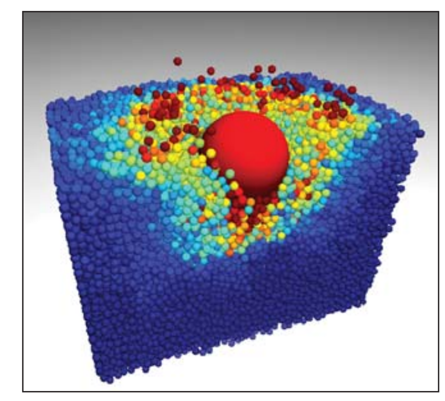
Una vez el lagarto se halla sumergido bajo tierra, es necesario emplear vídeos de rayos X para poder estudiarlo. La primera vez que observamos sus movimientos, nos sorprendió comprobar que el animal avanzaba a una velocidad de casi dos veces su longitud corporal por segundo (aún más rápido que la culebra real coralillo sobre un terreno llano). Para ello no empleaba sus extremidades, sino ondulaciones corporales de gran amplitud. El reptil avanzaba gracias al movimiento sinusoidal de su cuerpo, que se propagaba de la cabeza a la cola con una frecuencia determinada. Cuanto mayor era la frecuencia, mayor era también la velocidad de avance. En medios muy compactados, la frecuencia ascendía hasta cuatro ondulaciones por segundo.

Hallamos varios rasgos interesantes en la locomoción de los peces de arena. Esperábamos que, conforme aumentásemos el empaquetamiento de la arena (para incrementar la resistencia del medio) el movimiento del animal se enlentecería. (Los experimentos con barras pequeñas mostraban que la fuerza de arrastre en medios granulares muy compactados era casi el doble que en medios con un empaquetamiento bajo.) Con gran sorpresa, comprobamos que, a una frecuencia dada, la velocidad de avance del lagarto no dependía del coeficiente de empaquetamiento. Además, sus movimientos eran siempre los mismos: las imágenes de rayos X no permitían determinar el tipo de material (más o menos compacto) en el que nadaba el reptil. Y lo que resultó más extraño aún, encontramos que, en promedio, el pez de arena nadaba más rápido en materiales más compactos, ya que en ellos aumentaba la frecuencia de sus ondulaciones (la frecuencia máxima en empaquetamientos altos casi doblaba a la que alcanzaba en medios menos compactados).

Para caracterizar la locomoción del pez de arena, en nuestros experimentos y modelos empleamos un coeficiente denominado eficiencia de la onda, de uso común en el estudio de otros nadadores en medios deformables, como nematodos de pocos milímetros de longitud. Dicho coeficiente se define como el promedio de la velocidad de natación dividido por la velocidad de la onda (el producto de su frecuencia y su longitud de onda). Si el lagarto no resbala y el material no se mueve, la efi-

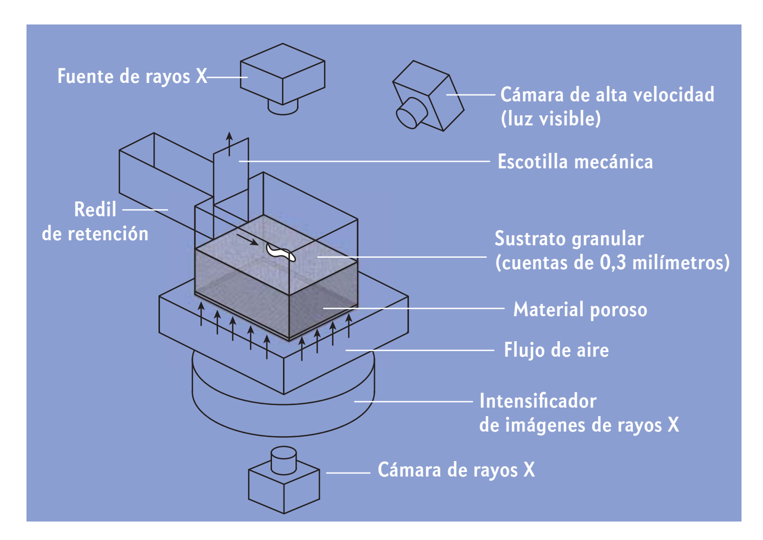


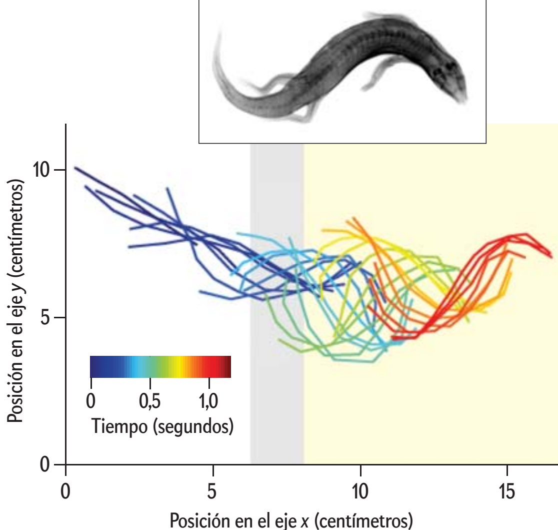






Interacciones en medios granulares: Una bola de aluminio de 5 centímetros de diámetro impacta sobre un contenedor de pequeñas esferas de 6 milímetros (*izquierda*). En ese momento, la «arena» actúa como un fluido (*centro*). Cuando la bola alcanza su estado de reposo, el medio «solidifica» de nuevo. Una técnica de simulación denominada dinámica molecular permite visualizar las fuerzas y las velocidades en el medio (*derecha*). En la imagen pueden apreciarse partículas que se mueven con lentitud y se comportan como un sólido (*azul*); otras se mueven mucho más rápido (*rojo*).





Nadar bajo tierra: Este dispositivo experimental (*izquierda*) permite observar la manera en que un pez de arena se entierra y nada. Primero, se emplaza al animal en un redil. Una cámara de rayos X filma al lagarto (*inserto*) una vez se abre la escotilla y se sumerge en la arena. La compactación del medio se regula gracias a un flujo de aire desde la base del lecho de arena. Una gráfica de la posición del dorso en función del tiempo muestra los cambios cuando el animal pasa de la superficie (*región blanca*) a sumergirse (*región gris*) y, por último, a nadar bajo tierra (*región amarilla*). Una onda sinusoidal impulsa al lagarto hacia delante. El patrón revela una eficiencia de la onda (cociente entre la velocidad de avance y la velocidad de la onda) igual a 0,5.

ciencia de la onda vale uno (de manera efectiva, es como si el animal se desplazara en un tubo). Si el reptil se hallase en el vacío, sin nada contra lo que empujar, la eficiencia de la onda valdría cero. Nuestros experimentos demostraron que, en un medio granular, la eficiencia de la onda del pez de arena ascendía a 0,5; casi el doble que la que muestran los nematodos en fluidos (alrededor de 0,2) y mayor que la de las serpientes en superficies con fricción (en torno a 0,3). Cabe resaltar, además, que la eficiencia de la onda de los peces de arena no dependía del grado de compactación del medio.

MODELOS DEL PEZ DE ARENA

Yang Ding, estudiante de doctorado de Goldman, empleó la técnica de la fuerza de rozamiento para estudiar estos fenómenos. Supusimos que sería aplicable también en la arena, dado que las imágenes de rayos X indicaban que, en las proximidades del animal, el medio se comportaba como un fluido. Además, la disipación en los medios granulares es considerable y las perturbaciones en una región no afectan a otras, por lo que las fuerzas sobre las distintas secciones del cuerpo del lagarto pueden tratarse en una aproximación lineal.

Si bien las fuerzas de fricción explican la locomoción de las serpientes, se desconocen los detalles de la dinámica en los medios granulares. Ding y Chen Li, otro estudiante de doctorado, midieron la fuerza de arrastre sobre un cilindro de acero inoxidable (con un coeficiente de rozamiento similar al de la piel del pez de arena) hundido a diferentes ángulos relativos a la dirección de desplazamiento. La fuerza axial se asemejaba a la experimentada en un verdadero fluido; la normal, en cambio, resultó ser mayor que la observada en un fluido o que la debida a una fricción de Coulomb. En cualquier caso, tal y como esperábamos, ambas fuerzas se mostraban independientes de la velocidad de arrastre.

Supusimos que el aumento de la fuerza normal en un medio granular era la causa de la elevada eficiencia de la onda en el pez de arena, sobre todo en comparación con otros animales como los nematodos, que usan las fuerzas que aparecen en fluidos viscosos, o las serpientes, quienes se valen de las fuerzas de fricción en sólidos. De hecho, cuando introdujimos la fricción de arrastre en el modelo basado en la TFR junto con los datos del movimiento medidos en el animal, el resultado predecía de manera correcta un aumento lineal de la velocidad con la frecuencia. Además, con independencia del coeficiente de empaquetamiento, arrojaba un valor de entre 0,4 y 0,7 para la eficiencia de la onda. Dicho resultado rondaba el valor experimental medido en el pez de arena (0,5). La incertidumbre se debía a nuestro desconocimiento de la fricción en el hocico del animal, con forma de pala. Las predicciones de eficiencia mínima provenían de un modelo con la cabeza plana; las de eficiencia máxima, de un modelo sin cabeza.

Así, la TFR demostraba que el animal se encontraba capacitado para «nadar» bajo la arena sin usar sus extremidades. Si bien es cierto que un medio semejante comparte algunas propiedades con los fluidos, queda descrito de manera mucho más precisa cuando se modeliza como un fluido friccional (aquel cuya descripción tiene en cuenta las fuerzas de arrastre) en lugar de como un fluido viscoso.

El modelo de la TFR proporciona una explicación plausible de la independencia de la eficiencia de la onda con el coeficiente de empaquetamiento. Del mismo modo que, en un material compacto, aumenta la fuerza de resistencia, también lo hacen las de empuje. El incremento de la fuerza normal daba cuenta de la alta eficiencia de la onda en el pez de arena, mayor incluso que la de una serpiente sobre una superficie plana y horizontal (algo que no deja de ser llamativo, puesto que el pez de arena se sumerge por completo en la arena).

Además, la TFR realiza una predicción interesante sobre el desplazamiento ondulatorio óptimo en un medio granular: a frecuencia fija, un incremento en la amplitud de la onda debería ir acompañado de un aumento en la velocidad del animal. No obstante, dado que la longitud del lagarto es finita, una amplitud mayor implica un avance más corto en cada ciclo (la cabeza se mueve más cerca de la cola; cuando la amplitud es máxima, el movimiento del cuerpo es casi perpendicular a la

dirección de avance). La TFR predijo una velocidad máxima a amplitudes de unas 0,2 veces la longitud de onda. Para nuestra sorpresa, comprobamos que los datos del pez de arena se agrupaban alrededor de este máximo.

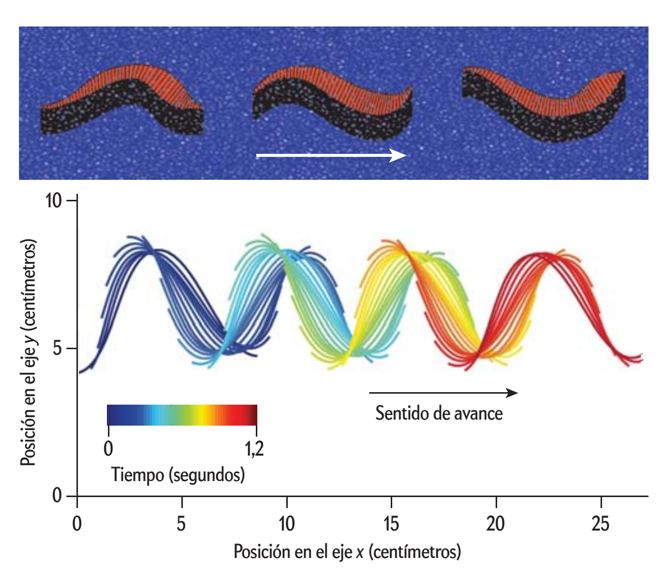
PECES DE ARENA VIRTUALES Y ROBÓTICOS

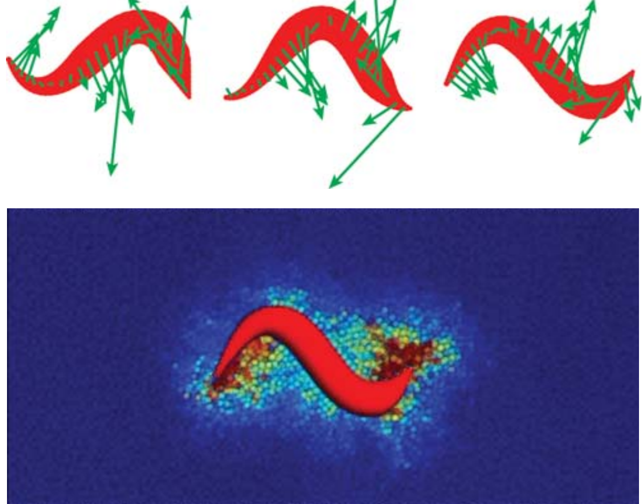
A pesar de la coincidencia entre los datos experimentales y los provenientes del modelo, este último mostraba algunos inconvenientes. En primer lugar, hemos de destacar la dificultad para modificar sus parámetros. Si nos propusiéramos analizar las consecuencias de emplear cuentas de tamaño diferente o con una superficie rugosa (con fricción), deberíamos efectuar de nuevo toda una serie de mediciones empíricas, lo que supondría un tiempo de trabajo enorme. Además, tampoco podíamos asegurar que los supuestos de la TFR (como la hipótesis de que las diferentes partes del animal no experimentan influencia mutua, o la de que la fuerza de arrastre ha alcanzado un estado estacionario) fuesen aplicables a la natación en la arena. Existía la posibilidad de que las coincidencias fuesen producto del azar.

Con ánimo de comprobar nuestros modelos, decidimos emplear un segundo método basado en las técnicas de dinámica molecular mencionadas arriba. Para describir la interacción entre partículas, el modelo incorpora la deformación por contacto, una fuerza viscosa para modelizar la pérdida de energía tras las colisiones (el coeficiente de restitución) y una interacción tangencial (que se asume dada por la fricción de Coulomb). Tras calibrarse mediante la comparación con las mediciones experimentales, el modelo de dinámica molecular exhibe una buena capacidad predictiva bajo todo un abanico de condiciones experimentales. Por ejemplo, las mediciones a una determinada velocidad de arrastre o bajo cierto ángulo predicen las fuerzas resultantes en cualquier otro caso. En lugar de las cuentas de cristal de 0,3 milímetros empleadas en los experimentos anteriores, en este caso usamos cuentas de unos 3 milímetros de diámetro. Ese cambio hacía factible la simulación informática, ya que reducía el número de partículas en un factor 1000 (nuestras simulaciones se prolongaron durante días; de otro modo, hubiesen tardado años). En nuestros experimentos pudimos comprobar que el pez de arena nadaba entre las cuentas mayores con la misma eficiencia que entre las de 0,3 milímetros.

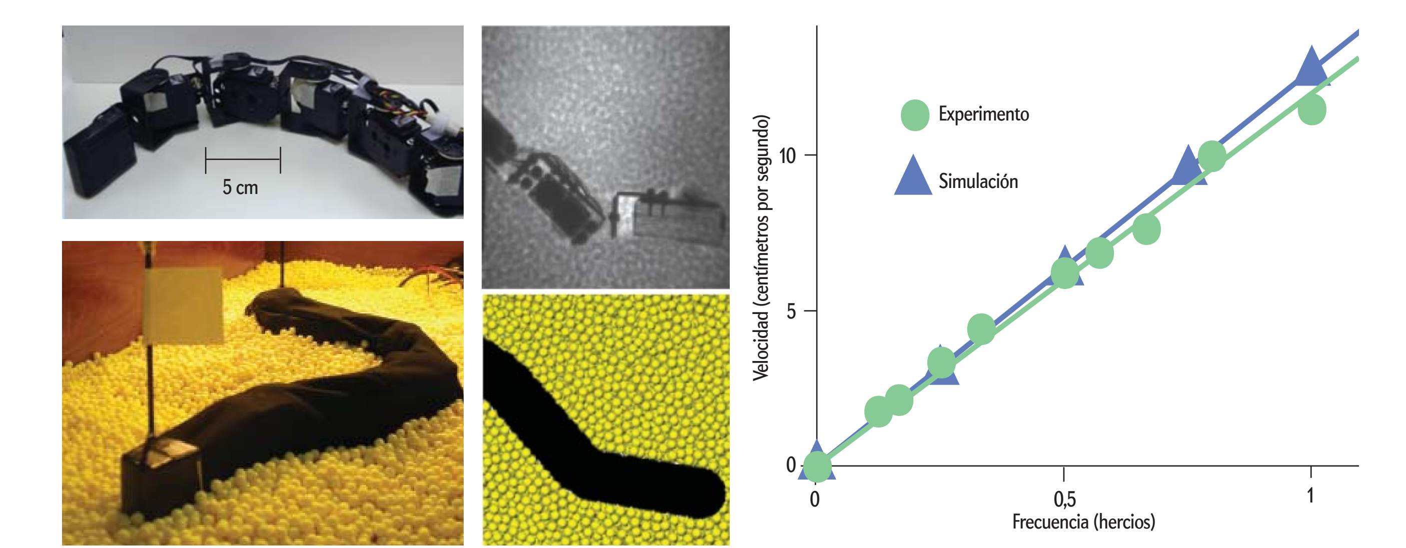
Una vez obtuvimos las propiedades de las partículas, creamos un pez de arena virtual a partir de los patrones de movimiento observados en los experimentos y a partir de las fuerzas calculadas en las simulaciones de dinámica molecular. Concluimos que la eficiencia de la onda predicha por los modelos de dinámica molecular coincidía con los cálculos basados en la TFR, así como con las mediciones experimentales. A diferencia de los modelos empíricos basados en la TFR, la dinámica molecular permite extraer información sobre los procesos que tienen lugar a escalas equiparables al tamaño de las partículas. Observamos un flujo muy amortiguado de partículas alrededor del animal y logramos estimar las fuerzas sobre distintos elementos. Al incorporar en la simulación la cinemática predicha por la TFR y la observada en el animal, el resultado era un movimiento más rápido. Ello suponía una validación adicional de nuestro modelo basado en la TFR. Estudios futuros sobre los modelos de dinámica molecular nos permitirán investigar la física responsable del reajuste entre el empuje y el arrastre, necesario para explicar la independencia entre la eficiencia de la onda y el coeficiente de empaquetamiento.

Deseábamos someter a nuestros modelos a una prueba más: llevarlos al mundo físico. A tal fin diseñamos un robot, un ejemplar mecánico del pez de arena que habría de nadar en un medio granular para, así, comprobar los principios que habíamos aprendido. Utilizamos para ello segmentos construidos con ser-





Lagarto virtual: Las simulaciones informáticas reproducen los patrones de la natación bajo tierra. En ellas, un contenedor virtual se llena con unas 150.000 esferas de 3 milímetros de diámetro. Sus interacciones se ajustan para que el modelo emule el comportamiento de las cuentas de 3 milímetros empleadas en los experimentos (*arriba, izquierda*). La simulación imita los movimientos reales (*abajo, izquierda*) y estima las fuerzas ejercidas sobre el cuerpo del animal y que lo impulsan hacia delante (*arriba, derecha*). El modelo informático predice las fuerzas de reacción que impulsan al animal (*flechas verdes*) y permite visualizar la movilidad de los granos del medio (*abajo, derecha*): la mayor parte del material se encuentra en estado sólido (*azul oscuro*), mientras que una pequeña región alrededor del lagarto se comporta como un fluido (*rojizo*).



Pez robot: **Modelo robótico del pez de arena compuesto de siete segmentos, cada uno con un servomotor programado para generar una onda sinusoidal apropiada para el avance (*izquierda, arriba*). El robot, recubierto con una «piel» de tela, nada en un medio granular con cuentas de plástico de 6 milímetros (*izquierda, abajo*). Las imágenes con rayos X revelan los movimientos del robot bajo la superficie (*centro, arriba*). En una simulación de dinámica molecular (*centro, abajo*), el pez de arena virtual se comporta como lo hacen el robot y el pez de arena real: la velocidad de avance aumenta con la frecuencia de onda (*derecha*).**

vomotores, comunes entre los aficionados a los aparatos teledirigidos. Los disponibles en el mercado limitaban las dimensiones de nuestro robot, por lo que también hubimos de emplear partículas de otro tamaño. Así, pasamos a utilizar granos de 6 milímetros para que las partículas no se introdujeran en los motores; además, eso evitaba una simulación con miles de millones de granos. Ryan Maladen, en colaboración con el ingeniero Paul Umbahnowar, de la Universidad Noroccidental, construyó un dispositivo que ondulaba siguiendo los mismos patrones que el pez de arena. Los resultados de nuestras simulaciones y los de nuestros experimentos con el robot coincidían con un margen del 5 por ciento. Tal y como predecían los modelos, el robot nadaba más rápido en el mundo real (y en la simulación) cuando usaba la cinemática óptima del pez de arena. La eficiencia de la onda óptima del robot de arena era de 0,3, tanto en el experimento como en la simulación. Atribuimos este resultado al número finito de segmentos del robot: en la simulación, cuando se aumentaba el número de segmentos para simular una anatomía continua, la eficiencia de la onda óptima se acercaba a 0,5.

DOS MUNDOS SIN PATAS

Hemos estudiado dos medios muy diferentes en los que la locomoción ondulatoria se muestra muy efectiva. En el caso de las serpientes, que reptan sobre tierra, la fricción anisotrópica de su vientre genera un empuje que supera al arrastre; bajo la arena, los flancos del animal aprovechan las propiedades de los materiales granulares que imitan la fricción en medios fluidos. Aunque las leyes que rigen las fuerzas de arrastre difieren en ambos medios, los modelos basados en la TFR (los cuales tienen su origen en la hidrodinámica) describen con éxito la dinámica de organismos que se mueven sobre y bajo terreno seco.

Nuestras investigaciones se han centrado en el movimiento en dos dimensiones. No obstante, también hemos referido el notable incremento en la eficiencia de avance del que se benefician las serpientes al elevar algunas partes de su cuerpo. Ello sugiere que, en general, el movimiento en tres dimensiones mejora la locomoción. Este es un aspecto que aún hemos de explorar en el caso del pez de arena. Nuestros experimentos con rayos X revelan que el animal no solo nada en un plano horizontal, sino que bucea en el medio con un pequeño ángulo.

Modelizar la interacción entre el organismo y el medio nos permite colaborar con biólogos para entender el comportamiento y la neuromecánica asociada a la locomoción de organismos con cuerpos alargados. El empleo de modelos no restringe la morfología del animal a la de la serpiente o la del pez de arena. Por supuesto, pueden considerarse otras formas anatómicas y tipos de onda alternativos para entender el desplazamiento en otros medios. La locomoción en los animales sin extremidades reviste un interés especial. ¿Es la velocidad o la eficiencia el motivo por el que un animal sin patas pasa de un movimiento de serpenteo a otro de desplazamiento lateral? Para entender tales procesos, nuestros proyectos futuros incluyen modelizar el interior de los animales; ello debería servir para determinar sus límites metabólicos y musculares.

Una comprensión más profunda requerirá desarrollar las leyes que rigen la dinámica de los movimientos sobre y bajo la tierra en otros sustratos. ¿Para qué materiales es válida nuestra aproximación de la fricción de Coulomb? ¿Qué sucede cuando un animal se entierra en un material húmedo? ¿Podemos usar leyes empíricas similares? Si no, ¿cómo habría que modificarlas? El desarrollo de modelos más precisos relativos a otros organismos y medios nos permitirá diseñar dispositivos robóticos sin extremidades, capacitados para desplazarse sobre terrenos complejos con mayor rapidez y eficiencia que sus homólogos naturales.



Principles of animal locomotion. R. M. Alexander. Princeton University Press, 2003.
The mechanics of slithering locomotion. D. Hu, J. Nirody, T. Scott y M. Shelley en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 106, pág. 10.081, 2009.
Undulatory swimming in sand: Subsurface locomotion of the sandfish lizard. R. D. Maladen, Y. Ding, C. Li y D. I. Goldman en *Science*, vol. 325, pág. 314, 2009.



David H. Freedman ha publicado sobre temas científicos, económicos y tecnológicos durante 30 años en *Atlantic, Newsweek, The New York Times, Science, Wired* y *Technology Review*. En su último libro, *Wrong*, explora las prácticas científicas que inducen a engaño.

EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

Aerolíneas espaciales

Los planes de la NASA para abandonar las misiones tripuladas podrían convertir en rutina los viajes al espacio

David H. Freedman

Hace algo más de dos años, James Doohan, el fallecido actor que encarnó a Scotty en *Star Trek*, fue agraciado con una última aventura por cortesía de Space Exploring Technologies Corporation. SpaceX, una empresa radicada en California, nació en 2002 con el objetivo de llegar hasta donde ninguna otra compañía privada lo había hecho antes: a una órbita alrededor de la Tierra. En agosto de 2008, SpaceX cargó las cenizas de Doohan en el tercer vuelo de pruebas de su Falcon 1, un cohete propulsado por queroseno y oxígeno líquido. Pero el último viaje de Doohan acabó antes de lo previsto. Tras dos minutos de vuelo, la primera etapa del cohete colisionó contra la segunda durante la separación. Era la tercera vez que SpaceX lo intentaba y la tercera que fracasaba.

¿Que esperaban?, debieron pensar los veteranos de la NASA. Poner en órbita cargas útiles o personas a cientos de kilómetros de altura siempre ha requerido un ejército de ingenieros, especialistas y gestores técnicos respaldados por miles de millones de dólares y décadas de desarrollo. Una operación privada a pequeña escala quizá lograse enviar una pequeña nave a unas decenas de kilómetros, como hizo Burt Rutan en 2004 para ganar el premio Ansari X-Prize. Pero aquello fue una pequeña acrobacia comparado con la clase de operaciones que la NASA ha venido realizando durante años para enviar la lanzadera espacial a la Estación Espacial Internacional. En el camino al espacio, los 100 primeros kilómetros no son sino la ruta de acceso. Después hay que acelerar hasta los siete kilómetros por segundo necesarios para mantener una carga útil en órbita a 300 kilómetros de la superficie terrestre.

¿En qué pensaba entonces el gobierno estadounidense cuando, en febrero de 2010, propuso que la NASA renunciase a las misiones tripuladas para dejarlas en manos de la industria privada? El plan contemplaba dar por perdidos los 9000 millones de dólares que hasta entonces se habían invertido en Constellation, el programa concebido para suceder a la lanzadera espacial en el transporte de astronautas y suministros hacia la Estación Espacial y, algún día, hacia la Luna. En su lugar, la NASA

EN SÍNTESIS

Cuando a mediados de este año la NASA retire las lanzaderas espaciales, EE.UU. ya no enviará astronautas ni suministros a la Estación Espacial Internacional.

El pasado octubre, el Gobierno estadounidense canceló el programa Constellation, concebido como sucesor de la lanzadera. En su lugar, pretende confiar el envío de astronautas al sector privado.

En teoría, un apoyo financiero inicial al sector empresarial podría catalizar una economía centrada en los viajes espaciales. La competencia debería propiciar precios cada vez más bajos.

Nadie sabe si las empresas que lo intenten lograrán entregar unas naves seguras, asequibles y fiables. Si fracasan, la exploración humana del espacio podría retrasarse durante decenios.

JOHN MATTOS



financiaría la puesta en marcha de empresas como SpaceX; después, contrataría sus servicios para llegar a la Estación Espacial Internacional.

Un coro de voces tachó el plan de ingenuo e imprudente. Entre las críticas más rotundas destacaron nada menos que las de Neil Armstrong, quien se burló ante la posibilidad de que el sector privado ocupase el lugar de la NASA. «Harán falta muchos años y una inversión considerable para alcanzar los niveles necesarios de seguridad y fiabilidad», sentenció. Dejar el transporte orbital en manos de la empresa privada, insistieron Armstrong y otros, supondría, en el mejor de los casos, una marcha atrás. Y si la iniciativa privada no aprovechase la oportunidad —como muchos creen que podría suceder—, todos los planes para enviar personas al espacio acabarían en punto muerto, quizá para siempre. Una vez desmantelada la enorme maquinaria de vuelos espaciales de la NASA, reconstruirla supondría mucho más tiempo y dinero del que nadie estaría dispuesto a invertir. Pero, a pesar de todas estas reservas, el pasado octubre el Congreso de los EE.UU. aprobaba a regañadientes la cancelación del Constellation.

Es cierto que la apuesta se presenta arriesgada, pero eso no significa que se trate de una apuesta mala. Existen razones para creer que el sector privado no tardaría en ponerse al día, y es posible que lo haga con resultados más baratos y fiables que cualquiera de los alcanzados jamás por la NASA. Además, después de tres décadas de escasas misiones tripuladas, la iniciativa podría contribuir a un objetivo con el que ya nadie ni siquiera soñaba: convertir el espacio en un lugar accesible no solo para un pequeño grupo de astronautas, sino también para legiones de científicos e ingenieros. Y, por qué no, para todos aquellos que gozaríamos de unos días o semanas de turismo espacial. Una oleada de viajeros espaciales quizá diese el impulso definitivo a una economía orbital autosuficiente, la cual podría estabilizar la presencia humana en el espacio —incluido Marte— de manera mucho más firme que lo que Constellation o cualquier otro programa hubieran logrado.

DEJAR HACER

Recurrir a la empresa para construir astronaves no es nada nuevo. Los extraordinarios vehículos que han transportado a los astronautas de la NASA han sido desarrollados y construidos por firmas privadas. Lo que cambiará a partir de ahora será la relación entre la NASA y sus contratistas. Al igual que el Pentágono, la NASA venía trabajando con ellos en condiciones de «coste más margen»: reembolsaba los gastos y añadía un beneficio fijo.

Los expertos coinciden en que dicho sistema de contratación aumenta los costes y la complejidad del proceso. Cuanta más tecnología se incorpora a un proyecto, más dinero reciben los contratistas y menores son las posibilidades de que alguien acuse a la NASA de comprometer las misiones con tacañerías. Y, según no pocos, esas fueron las razones de que los vuelos tripulados de la agencia se viesen reducidos a órbitas bajas durante casi treinta años, con un coste de más de mil millones de dólares por vuelo. Ello impuso severos límites al número de vuelos, con la consiguiente ausencia de resultados dignos de mención. A tenor de los críticos, el programa Constellation hubiese supuesto el mismo tipo de despilfarros.

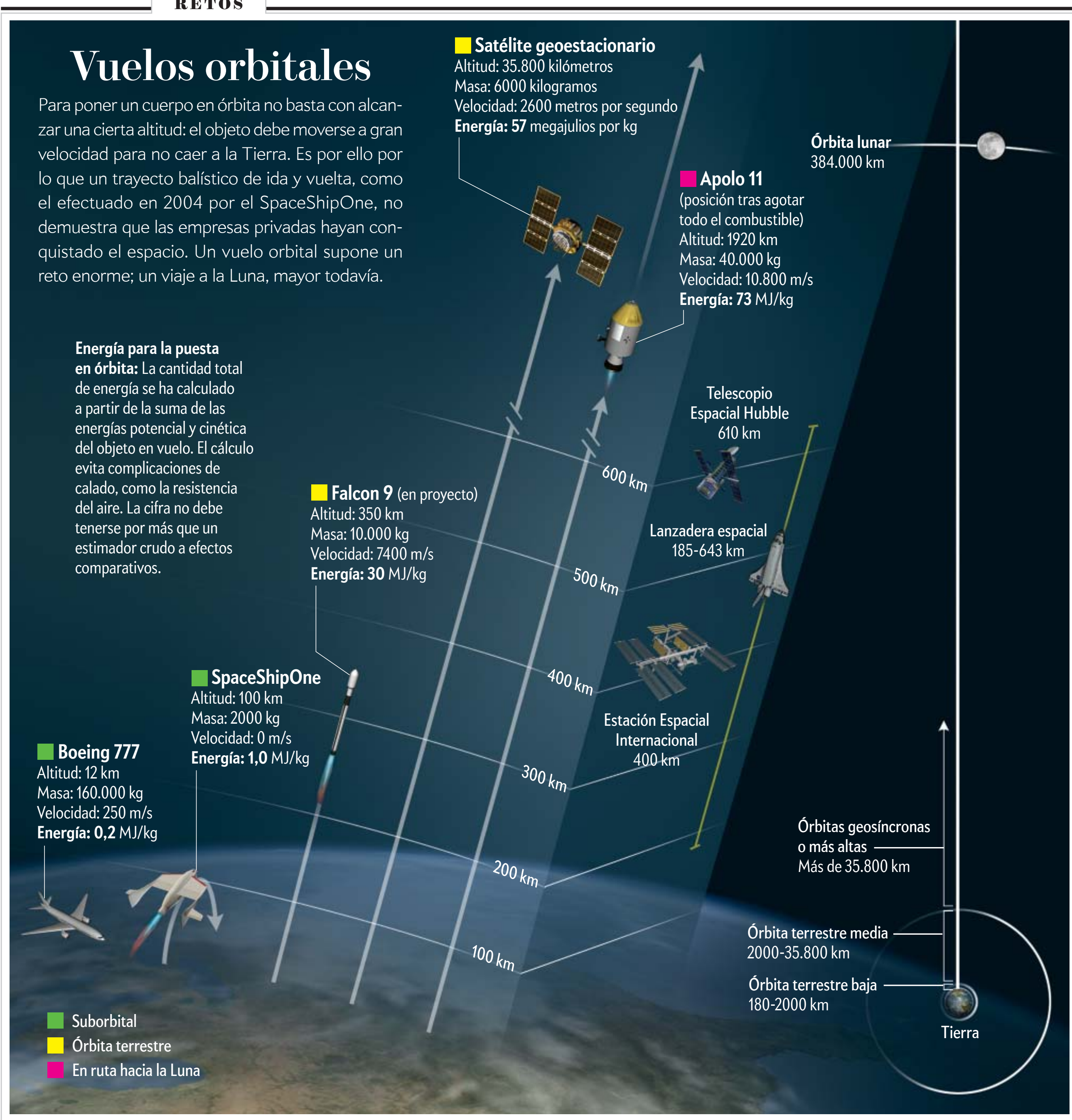
Un modelo basado en pagar por el producto final tampoco carecería de precedentes, señala Paul Guthrie, analista de Tauri Group, una consultora espacial y de defensa estadounidense. Desde la Segunda Guerra Mundial, el Gobierno de EE.UU. ha invertido enormes recursos en ciencia y tecnología industriales, con unos beneficios comerciales inciertos pero potencialmente elevados. Ello abrió paso a la industria de la biotecnología o de la informática, entre otras. Al igual que ocurre ahora con la exploración espacial, aquellas empresas también se enfrentaron en sus comienzos a desalentadoras dificultades técnicas y económicas. Pero las vencieron gracias a unos programas oficiales muy similares al nuevo plan de la NASA: invertir en el desarrollo inicial de esas empresas para convertirse después en un cliente seguro, al tiempo que la industria mejora sus productos y genera una economía de escala (aquella en la que una mayor producción repercute en una disminución de los costes). A principios del decenio de los setenta, el Departamento de Defensa de EE.UU. fue el principal financiador y cliente de numerosos fabricantes de microcircuitos. Después, la ley de Moore y una competencia creciente rindieron unas mejoras increíbles en las posibilidades y el coste de los circuitos integrados.

La nueva política intenta devolver a la NASA la gloria de la que gozó en la década de los sesenta y transformarla en una verdadera agencia de investigación y desarrollo. La próxima Luna sería Marte

Nadie sabe si los viajes espaciales también se rigen por una ley de Moore, pero nada dice que su coste deba mantenerse para siempre en los extraordinarios precios actuales. Las empresas que compitan bajo las nuevas condiciones de financiación se verán obligadas a encontrar la forma de ahorrar dinero. Si rebasan el presupuesto, deberán hacerse cargo de los gastos. Pero, si ahorran con respecto a lo previsto, la diferencia será para ellas. El proceso convierte una gestión eficiente en ganancias netas, en lugar de en un dinero público que desaparece de la partida de gastos solo para transformarse en «margen».

SpaceX, la empresa líder de la nueva industria aeroespacial, ya ha dado los primeros pasos al respecto. Al fabricar por sus propios medios los tornillos de aluminio anodizado, ha conseguido rebajar su precio final desde 15 dólares a 30 céntimos por unidad. Gracias a una fórmula de elaboración propia, ha reducido el coste del material de carbono que emplean los escudos térmicos, con lo que además evita su dependencia del único suministrador del mercado. También ha eliminado los enormes gastos derivados de los encargos a medida de las tuberías cónicas que venían empleando las lanzaderas para conseguir un escape libre de turbulencias: para ello, diseñó tuberías de bajo coste, de diámetro constante y con forma de espiral, que suavizan el flujo de los gases de escape.

Si desea potenciar innovaciones semejantes, la NASA tiene que dejar hacer. La agencia siempre había especificado a sus contratistas todos los detalles del proceso de fabricación de vehículos. Ahora, la NASA se limitará a estipular los objetivos que debe cumplir un sistema una vez acabado. «No seremos demasiado puntillosos acerca de cómo esperamos que las empresas cumplan nuestros requisitos. Simplemente enunciaremos los objetivos y les daremos la máxima flexibilidad en los procedimientos», afirma Phil McAlister, miembro del equipo de la NASA responsable de la evaluación de proyectos. «Después, en etapas concretas realizaremos las supervisiones necesarias para verificar que se están cumpliendo los requisitos.» Para ayudar



DIN FOLEY

a las empresas a mantener unos vehículos tan sencillos y eficientes como sea posible, el nuevo plan renuncia al requisito que Constellation había impuesto sobre el vehículo resultante: a saber, que fuese capaz de llegar hasta la Luna. Ahora, la única finalidad que se persigue consiste en transportar, con seguridad y a bajo coste, personas y carga hasta la Estación Espacial Internacional.

La cancelación de las misiones lunares ha levantado ampollas. Pero dichas misiones no fueron concebidas sino como simulacros de la auténtica meta a largo plazo: llevar seres humanos a Marte. Y, pese a lo que algunos críticos han insinuado, el plan no constituye una coartada para que la NASA invierta menos dinero en misiones espaciales ni para que abandone el proyecto a largo plazo de la exploración humana del espacio. Más bien, el nuevo plan reconoce de manera implícita que una visita de ida y vuelta a Marte requerirá un progreso técnico muy superior al que Constellation hubiera proporcionado. Al liberar a la NASA de la obligación de invertir todo su dinero y experiencia en el transporte orbital, el plan da un respiro a la agencia para que pueda concentrarse en dichos avances. «La política actual reducirá costes y mejorará la gestión de las órbitas bajas. Así la NASA podrá dedicarse a proyectos de investigación y desarrollo, a las ciencias de la Tierra y del espacio», sostiene Eligar Sadeh, presidente de Astroconsulting International e investigador del Centro Eisenhower de Estudios Espaciales y Defensa de la Academia de la Fuerza Aérea de EE.UU. De hecho, el plan llama a incrementar el presupuesto de la NASA para los próximos años. En muchos aspectos, intenta devolver a la NASA

el protagonismo del que gozó en la década de los sesenta. Al encargar a empresas civiles las operaciones en órbitas terrestres bajas, de sobra conocidas por la NASA, la agencia volvería a convertirse en una verdadera autoridad en investigación y desarrollo. La próxima Luna sería Marte.

PUESTA EN MARCHA

En cualquier caso, los incentivos a contratistas, unos controles más flexibles y el consiguiente ahorro no habrán supuesto unas medidas tan acertadas si, al final, las empresas no lograran entregar un vehículo orbital seguro, fiable y del mismo tipo que el que hubiera producido Constellation. ¿Superará el sector privado la prueba? Aún es prematuro sacar conclusiones, pero algunas señales alentadoras ya se han producido. En septiembre de 2008 —solo un mes después del lanzamiento que se desintegró con los restos de James Doohan a bordo— un Falcon 1 de SpaceX se convertía en el primer cohete de combustible líquido de propiedad privada que entraba en órbita. A ello siguió, un año después, la puesta en órbita del Falcon 9, un vehículo más potente y diseñado con el objetivo de transportar, algún día, un vehículo tripulado.

Los ensayos de SpaceX resultan alentadores, pero por ahora constituyen las únicas pruebas fehacientes de éxito por parte de la industria privada. Aparte de SpaceX, solo Orbital Sciences, una empresa afincada en Virginia, se prepara en estos momentos para fabricar un vehículo orbital. Por el momento, sin embargo, no tiene mucho que mostrar. Ambas compañías han contratado a algunos de los gestores e ingenieros espaciales mejor reputados, pero es imposible anticipar si alguna de ellas logrará presentar un vehículo aceptable, con unos presupuestos reducidos y sin que una multitud de ingenieros de la NASA les faciliten instrucciones detalladas para su diseño.

Nadie dice que no puedan lograrlo, y probablemente lo hagan si se les da la oportunidad, sostiene John M. Logsdon, antiguo director del Instituto de Política Espacial de la Universidad George Washington. Y aunque es factible que sus vehículos resulten más baratos que los que hubiera fabricado Constellation, puede que carezcan de la misma seguridad y eficiencia; al menos los que vean la luz en los próximos cinco o diez años. «A causa de una menor supervisión por parte del Gobierno, esta primera etapa se beneficiará de alguna reducción de costes. Pero en la próxima veremos participantes nuevos, y puede que entonces sí surjan auténticas innovaciones», afirma. Entre las empresas de reciente creación y muy prometedoras, de las que se rumorea que competirán por los futuros contratos, se encuentran Blue Origin, erigida por Jeff Brezos, fundador de Amazon; Armadillo Aerospace, creada por John Carmack, magnate del *software*, y Xcor Aerospace, fundada por varios veteranos de la industria espacial.

Pero la industria no se limitará a los fabricantes de vehículos orbitales. Si la reducción en los costes del transporte lleva a mucha más gente al espacio, no toda tendrá cabida en la Estación Espacial. La solución al problema se espera con impaciencia: Bigelow Aerospace, una compañía de Las Vegas, ha fabricado compartimentos hinchables cuyos componentes modulares pueden transportarse hasta el espacio y, una vez allí, ensamblarse y convertirse en habitáculos orbitales. Cabe esperar que aparezcan otras empresas dedicadas a la fabricación de hábitats, laboratorios, almacenes y equipos de construcción espaciales. La competencia aumentará si otros países se suman a la carrera espacial. India y Japón, por ejemplo, ya han comenzado a desarrollar sus propios proyectos.

Los contratistas tradicionales también se disputarán futuros contratos. No cabe duda de que esas gigantescas compañías poseen la capacidad de construir vehículos espaciales adecuados. La única incógnita reside en si podrán hacerlo con una política de precios fijos y bajo la presión de reducir costes. United Launch Alliance (ULA), una empresa conjunta de Boeing y Lockheed Martin, ya pone en órbita cargas útiles por 100 millones de dólares, un precio razonable si se compara con los lanzamientos de la NASA. Aunque el precio ascienda a cuatro veces lo que pretende cobrar SpaceX, ULA cuenta con una reputación de fiabilidad como tarjeta de presentación. «Si el cliente no mira por encima del hombro para supervisar cada detalle, también nosotros podemos trabajar a coste fijo», sostiene Jayne Schnaars, vicepresidente de Boeing para el desarrollo empresarial de la exploración del espacio.

UNA ECONOMÍA ORBITAL

La mejor recompensa sería una reducción en el coste de los vuelos orbitales tan acusada como para provocar un aumento considerable de la demanda: ello generaría más competencia y abarataría el precio aún más. A su vez, el círculo se completaría con la creación de más infraestructura en órbita —más lugares a los que viajar y un mayor número de actividades espaciales—. En ese caso, habría nacido una economía espacial autosuficiente.

NUEVOS PROTAGONISTAS

Sucesores de la NASA

Más de 10 empresas han anunciado su intención de enviar personas al espacio. Los astronautas podrían llegar a la Estación Espacial Internacional en el Taurus (*1*), construido por Orbital Science Corporation; el Falcon 9 de SpaceX (*2*), lanzado con éxito a principios del verano pasado, o en una variante del cohete Delta (*3*), fabricado por United Launch Alliance, una empresa conjunta de Boeing y Lockheed Martin. Los turistas podrían disfrutar de vuelos suborbitales a bordo de los vehículos construidos por Xcor (*4*), Virgin Galactic (*5*), Blue Origin (*6*) o Armadillo Aerospace (*no se muestra*).













CORTESÍA DE ORBITAL SCIENCES CORPORATION (1); CORTESÍA DE SPACEX (2); CORTESÍA DE UNITED LAUNCH ALLIANCE (3); CORTESÍA DE MIKE MASSEE, XCOR (4); CORTESÍA DE MARK GREENBERG, VIRGIN GALACTIC (5); CORTESÍA DE BLUE ORIGIN (6)

Pero ¿hay tanta gente dispuesta a volar como para poner todo el proceso en marcha? Sin un camino claro que lleve a unos beneficios reales más allá de lo que la NASA esté dispuesta a desembolsar, el sector privado carecerá de meta. «El espacio podría convertirse en la próxima Internet y ofrecer a EE.UU. una fuente duradera de crecimiento económico», afirma Guthrie, de Tauri Group. «Pero, ante todo, surge la pregunta sobre cómo se desarrollará esa economía.»

Desde luego, el sector ya cuenta con un mercado: el que ha venido atendiendo las necesidades de la lanzadera espacial. EE.UU. y otros países esperan con impaciencia el momento en que sea posible enviar científicos y especialistas a la Estación Espacial Internacional para efectuar investigaciones médicas, biológicas o químicas en condiciones de gravedad cero, o para revisar los equipos destinados a observar la Tierra y el espacio. De hecho, el plan incluye una prórroga en la vida de la Estación Espacial desde 2015 hasta 2020. Si la industria lograse bajar el precio de la puesta en órbita hasta los 5 millones de dólares, aumentaría el número de países interesados en enviar investigadores. Pero incluso un precio semejante, ridículo en comparación con los actuales, seguiría siendo excesivo para la mayoría de las entidades de financiación. Podrían aparecer decenas de viajeros al año, pero nunca varios centenares.

Las posibilidades de una economía orbital floreciente aumentarían en gran medida si la manufactura en condiciones de microgravedad se mostrase rentable. Pero, a día de hoy, no existen signos de que algo así vaya a suceder. La ausencia de gravedad que, a efectos prácticos, experimentan los cuerpos en órbita (el campo gravitatorio no es cero ni mucho menos, pero un objeto en órbita se halla en caída libre, por lo que los efectos de la gravedad desaparecen) facilita la obtención de cristales de gran tamaño y elevada pureza, rodamientos perfectos o cuerpos con una altísima simetría esférica. Con independencia del sobreprecio que productos tan poco comunes pudieran exigir, los gastos de instalación y explotación de una fábrica espacial superarían con mucho ese extra, al menos en el caso de cualquier producto conocido hasta la fecha. «Incluso si ahí fuera hubiese un asteroide de diamante, el coste de llegar hasta él y traerlo no supondría un negocio rentable», afirma Lon Levin, cofundador de XM Satellite Radio y presidente de SkySevenVentures, un fondo radicado en Washington que invierte en iniciativas espaciales, entre otras.

Pero la mera posibilidad de descubrir algún producto farmacéutico o algún nanomaterial que sólo pueda obtenerse en condiciones de microgravedad debería suponer un acicate para algunos investigadores industriales. «Hasta ahora, el gasto extraordinario que suponía colocarse en órbita ha limitado esa área de experimentación —sostiene Schnaars, de Boeing—. Conforme bajen los precios, más lo intentarán y mayores serán las posibilidades de que alguien lo consiga.» Guthrie añade que quizá baste con un descubrimiento genial para poner en marcha todo un proceso de manufactura espacial.

Aun así, la mayoría coincide en que la mejor opción a corto plazo habrá de llegar de la mano del turismo. Desde 2001, Rusia ha enviado siete turistas a la estación espacial —uno de ellos dos veces— en la nave espacial Soyuz, a un precio de entre 30 y 50 millones de dólares. Si los costes se redujesen de manera sustancial, el número de turistas aumentaría. «Hay un hecho —y solo uno— con el que podemos contar: el número de turistas que desearían visitar la Estación Espacial no es cero —afirma Levin—. Sabemos que hay una serie de personas que estarían dispuestas a pagar entre 10 y 20 millones de dólares para ir. Si el precio bajase hasta un millón, quizá el número de interesados aumentaría hasta varios centenares. Eso supondría un auténtico negocio.» Además, adjudicar un número de asientos mediante algún sistema de lotería (por ejemplo, vender por 100 dólares una oportunidad entre 10.000) incrementaría las ventas aún más.

Incluso si ahí fuera hubiese un asteroide de diamante, el coste de llegar hasta él y traerlo no supondría un negocio rentable

Pero Levin y otros apuntan un juego menos optimista: la posibilidad de que una industria espacial en ciernes vea un accidente con víctimas mortales. De ocurrir algo así, el negocio del turismo espacial se esfumaría al instante, afirma Sherman McCorkle, consejero delegado de Technology Ventures, una consultora de Nuevo México (un estado que ha emprendido la construcción de un «puerto espacial» de 300 millones de dólares). «Si el séptimo vuelo turístico fracasa, la probabilidad de que no haya un octavo durante muchos años sería enorme —dice McCorkle—. Los empresarios aprenden a reparar los fallos después de que se presentan. Eso puede funcionar con las comunicaciones por satélite, pero no con el turismo espacial.»

Scott Tibbits, fundador del Centro eSpace para la Emprendeduría Espacial, que trabaja en asociación con la Universidad de Colorado, no comparte ese parecer. Opina que ni el riesgo ni una posible catástrofe disuadirían a una gran parte de los interesados: «Parte de la sociedad contempla con buenos ojos los riesgos del turismo de aventura. Después de que ocho personas murieran en 1996 cuando escalaban el Everest, la venta de expediciones al gran público se disparó. Tampoco nadie habla del fin del negocio del paracaidismo cuando alguien tiene un accidente. La tolerancia hacia los riesgos espaciales aumentará, sobre todo cuando los precios se sitúen entre uno y cinco millones de dólares por vuelo y persona. Con tarifas semejantes, muchísima gente se mostraría deseosa de volar tan pronto como una compañía pudiera enviarla.»

Salvo que en breve aparezca alguna alternativa, parece probable que solo el turismo posea el potencial para poner en marcha una economía espacial. Y, al menos durante algunos años, la evolución podría ser muy lenta. «Desde luego, se trata de un mercado limitado para el futuro próximo», concede Logsdon. El turismo de aventura para multimillonarios puede parecer una percha superficial en la que colgar el sueño de la exploración del espacio. Pero ello no quiere decir que carezca de lógica: el capitalismo constituye la herramienta de desarrollo técnico más poderosa que la humanidad haya conocido hasta ahora, y el impulso de explorar el espacio representa el proyecto más ambicioso de la humanidad. Puede que la mejor manera de lograrlo pase por combinar ambas cosas.

PARA SABER MÁS

Rocketeers: How a visionary band of business leaders, engineers and pilots is boldly privatizing space. Michael Belfiore. Smithsonian, 2007.

Space sticker shot. George Musser en *Scientific American*, vol. 300, n.º 1, págs. 22-23, enero de 2009.

Informe final del Comité de Vuelos Tripulados de EE.UU. Presidido por Norman R. Augustine, octubre de 2009. **www.nasa.gov/offices/hsf/home**



Ted Hill es doctor en matemáticas por la Universidad de California en Berkeley y profesor emérito de matemáticas en el Instituto de Tecnología de Georgia. Ha ocupado numerosos puestos de profesor visitante en Costa Rica, Alemania, Israel, México y los Países Bajos. Sus intereses se centran en la teoría de la probabilidad, con énfasis en la ley de Benford, los problemas de reparto equitativo y los de detención óptima.

MATEMÁTICAS

El problema de la detención óptima

Cuándo es necesario apostar y cuándo retirarse del juego

Theodore P. Hill

Toda decisión entraña un riesgo. Elegir el momento adecuado para continuar con una acción determinada o detenerla puede resultar crucial. El día en que Microsoft lance al mercado el programa Word 2020, deberá decidir cuándo da por terminado el período de perfeccionamiento del mismo. Si un huracán se desplaza hacia Florida, las autoridades han de fijar el momento en que pasarán de la alerta a la evacuación. Actuar a destiempo puede resultar catastrófico. Napoleón aprendió esa dura lección tras invadir Rusia. También en la vida cotidiana hemos de decidir una y otra vez cuándo abandonar: cuándo estacionaremos el coche, qué oferta de empleo debemos aceptar sin esperar otra mejor o en qué momento sería conveniente jubilarnos.

Los ejemplos anteriores comparten la siguiente propiedad: alguien ha de decidir acerca de un proceso que evoluciona con el tiempo y que se halla sujeto a un factor de aleatoriedad. Para tratar de maximizar beneficios o reducir costes, nos vemos forzados a optar sobre la base de los datos conocidos, pero sin saber con certeza qué nos depara el futuro. En algunos casos, casi nada se sabe sobre el porvenir; en otros, contamos con abundante información. Nadie puede predecir el futuro; sin embargo, la teoría de la probabilidad puede ayudarnos a aumentar las posibilidades de éxito.

Aunque la historia de las matemáticas se remonta miles de años atrás —hasta Euclides o incluso antes—, la teoría de la probabilidad es mucho más reciente y su origen bastante más ambiguo. En 1564, Girolamo Cardano analizaba los juegos de dados en su manuscrito *De Ludo Aleae*, el cual, sin embargo, no vería la luz hasta casi un siglo después. A pesar de que Galileo y otros científicos del siglo xvii contribuyeron a la teoría de la probabilidad, su fundación suele atribuirse al intercambio epistolar que, en 1654, mantuvieron los matemáticos franceses Blaise Pascal y Pierre de Fermat. Ambos se interesaron por el azar y los juegos de dados. Se cuestionaron, por ejemplo, si era prudente apostar por una pareja de seises en 24 lanzamientos de dos dados.

La correspondencia entre Pascal y Fermat inspiró avances significativos en los estudios de Abraham de Moivre, Christiaan Huygens, Siméon Poisson, Jacob Bernouilli, Pierre-Simon Laplace y Carl Friedrich Gauss, ya en el siglo xix. No obstante, durante largo tiempo no hubo una definición formal de probabilidad lo bastante precisa como para poder aplicarla ni lo sufi-

EN SÍNTESIS

La teoría de la detención óptima intenta determinar en qué momento hemos de tomar una determinada acción para que aumenten nuestras probabilidades de éxito.

Son numerosas sus aplicaciones a problemas de la vida cotidiana. En particular, en los últimos años ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de la matemática de los sistemas financieros.

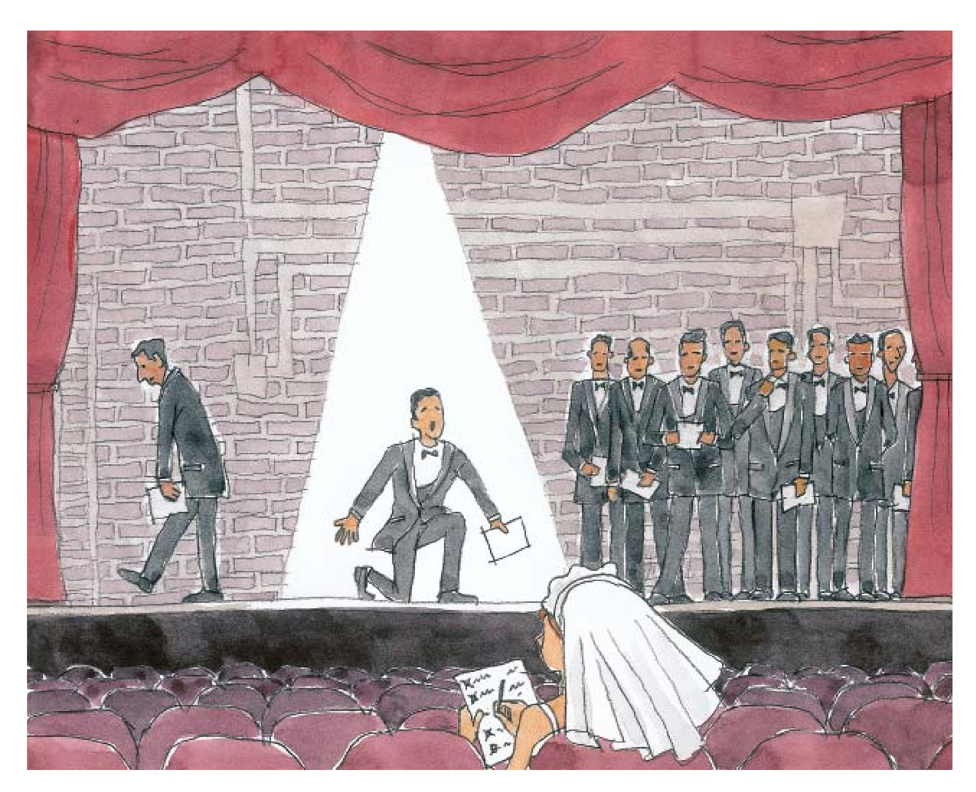
La simplicidad de los enunciados de los problemas que trata de resolver contrasta con la enorme dificultad que revisten muchos de ellos. A día de hoy, aún se desconoce la solución de algunos problemas clásicos.



Los juegos de azar, como la partida de dados que reproduce este detalle de la *Feria flamenca*, de Marten van Cleve (1520-1570), han atraído a la humanidad durante siglos. Su práctica ha generado mucho más que entretenimiento: el interés por aumentar las ganancias dio nacimiento a la teoría de la probabilidad, así como a las estrategias de detención óptima.

cientemente robusta como para abordar los indicios, cada vez más claros, de la existencia de fenómenos aleatorios en la ciencia. Habría que esperar casi cuatro siglos desde Cardano hasta que, en 1933, el matemático ruso Andrei Kolmogoroff lograra fundamentar la teoría de la probabilidad sobre una base axiomática formal, merced a una rama de las matemáticas entonces incipiente y que hoy conocemos como teoría de la medida.

También la historia de los problemas de detención óptima, una rama de la teoría de la probabilidad, comienza con los juegos de azar. Uno de los primeros descubrimientos al respecto se atribuye al matemático inglés Arthur Cayley, de la Universidad de Cambridge. En 1875, Cayley elaboró una estrategia óptima para determinar cuándo debía dejar de comprar boletos de lotería. Las aplicaciones prácticas fueron surgiendo poco a poco. Durante la Segunda Guerra Mundial, Abraham Wald y otros desarrollaron el análisis secuencial estadístico, que ayudaría en la toma de decisiones estratégicas militares e industriales que implicaban a grandes cantidades de individuos o de recursos. Poco después de la guerra, Richard Bellman, experto en matemática aplicada, ideó la programación dinámica para determinar estrategias óptimas en otros problemas de detención.



El problema del matrimonio: **¿A cuántos pretendientes es razonable escuchar antes de decidirnos por uno de ellos?**

TOM DUNNE/*AMERICAN SCIENTIST*

En los años setenta, Fischer Black y Myron Scholes descubrieron una fórmula que permitía evaluar diferentes opciones de compra (*stock options*) en los mercados de valores. Esto no solo transformó los mercados financieros de todo el mundo, sino que también le valió a Scholes y su colaborador Robert Merton el premio Nobel de economía en 1997 (para entonces, Black había fallecido). A día de hoy, las técnicas de detención óptima en las que se basa la fórmula de Black-Scholes siguen siendo objeto de investigación. Y, como veremos, incluso algunos de los aspectos más elementales de esta rama de la teoría de la probabilidad no dejan de sorprender.

EL PROBLEMA DEL MATRIMONIO

Suponga que ha decidido casarse y que, para seleccionar a la pareja de su vida, opta por interrogar a un máximo de 100 posibles cónyuges. El orden de las entrevistas es aleatorio y usted desconoce cualquier dato sobre aquellos candidatos con quienes aún no ha hablado. Al finalizar cada una de las entrevistas, debe decidir si se casa con esa persona o si, por el contrario, pierde para siempre la posibilidad de hacerlo. Si no ha encontrado pareja después de haber entrevistado al candidato o candidata número 99, no le quedará más remedio que casarse con el número 100. ¿Cómo dar con la mejor de las parejas posibles?

El problema del matrimonio (también conocido como el de la secretaria, el de la dote o el de la mejor elección) cuenta con una larga y rica historia. Desde luego, es posible que la mejor pareja de todas sea la primera a la que entrevistemos. La probabilidad de que así ocurra es de 1/100. Pero ¿se podría afinar más la elección? Existe una regla simple que permite acertar con el mejor de los candidatos en, al menos, un tercio de las ocasiones.

En la época en que era soldado del Ejército del Aire durante la guerra de Vietnam, John Elton, ahora en el Instituto de Tecnología de Georgia, transformó el problema del matrimonio en un método para ganar apuestas en el cuartel. Elton pidió a sus compañeros que escribieran en tiras de papel 100 números diferentes, positivos o negativos y tan grandes o pequeños como quisieran. Luego debían colocarlas boca abajo sobre una mesa y mezclarlas bien. Apostó que era capaz de volver las tiras de papel de una en una y detenerse nada más salir el número más alto de todos. Elton convenció a sus compañeros de que era «evidente» que la probabilidad de acertar era mínima; así, si ganaba, cobraría 10 dólares, pero, si perdía, pagaría solo 1. No faltaron apostantes. Elton venció en casi un tercio de las ocasiones, por lo que se embolsó un buen dinero. ¿Cómo lo hizo?

Señalemos, en primer lugar, que existe una estrategia para acertar más de una cuarta parte de las veces. Denominemos «récord» al número más alto de entre todos los vistos hasta el momento. Supongamos ahora que examinamos la mitad de las tiras sin detenernos en ningún momento, por altos que sean los números. A partir de ese momento, nos plantaremos en el primer récord que encontremos. Si el segundo número más alto de los 100 anotados hubiera salido entre los primeros 50 y el más alto se encontrase entre los 50 restantes —lo que ocurrirá en una de cada 4 ocasiones—, habríamos ganado.

Se trata de una buena estrategia. Pero existe otra mejor: sacar 37 papelillos y detenernos en el siguiente récord. John Gilbert y Frederick Mosteller, de la Universidad de Harvard, de-

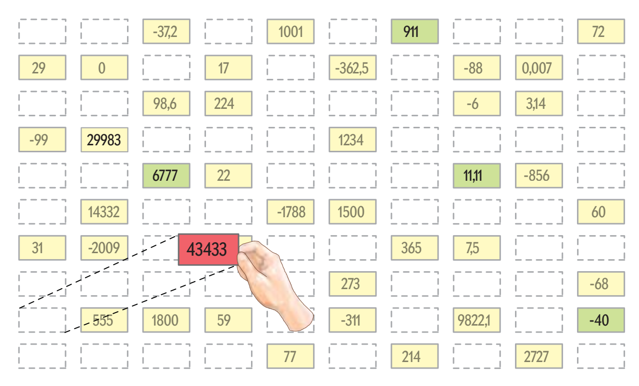
¿Cuándo parar?

Supongamos que alguien escribe en tiras de papel *N* números diferentes y tan grandes o pequeños como desee. Después, coloca las tiras boca abajo y las dispone en orden aleatorio sobre una mesa. Nuestro objetivo consiste en volver uno a uno los boletos y detenernos cuando aparezca el número más alto. ¿Existe alguna manera de maximizar nuestras posibilidades de victoria?

La teoría de detención óptica permite demostrar que la siguiente estrategia garantiza las posibilidades de vencer en más de un tercio de las ocasiones: daremos la vuelta a *N/e* boletos sin detenernos (*e* es la base de los logaritmos naturales, *e* = 2,71828...); después, continuaremos extrayendo números uno a uno y nos detendremos cuando aparezca el mayor de todos los que hayamos visto hasta entonces. Las probabilidades de victoria ascenderán a $1/e \approx 0{,}37$.

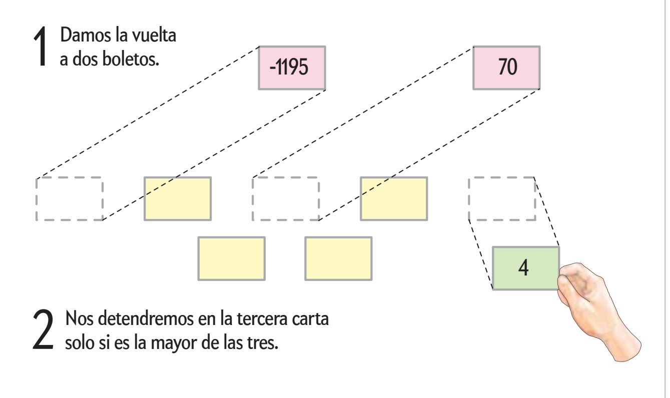
		-37,2		1001					72
29	0		17		-362,5		-88	0,007	
		98,6	224				-6	3,14	
-99	29983				1234				
			22					-856	
	14332			-1788	1500				60
31	-2009		0,051			365	7,5		
					273				-68
	555	1800	59		-311		9822,1		
				77		214		2727	

1 En el caso de 100 boletos, examinaremos 37 de ellos sin interrupción.



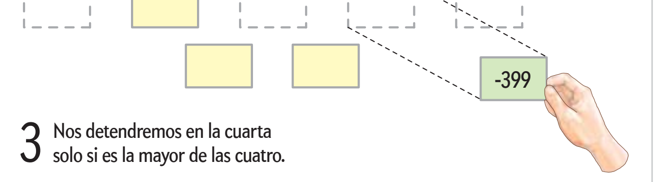
2 A partir de entonces, nos detendremos cuando aparezca el número más alto de todos los vistos hasta entonces.

Si nuestro objetivo no consiste en dar con el más alto de todos, sino con uno de los *k* mayores, la teoría de detención óptima también asegura estrategias que maximizan las posibilidades de acertar. En el caso de $N = 7$ y $k = 2$, la estrategia que mostramos garantiza la victoria en 2/3 de las ocasiones.

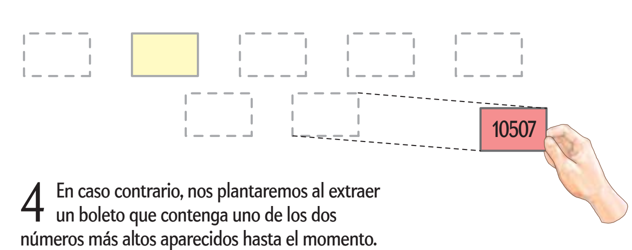


1 Damos la vuelta a dos boletos.

2 Nos detendremos en la tercera carta solo si es la mayor de las tres.



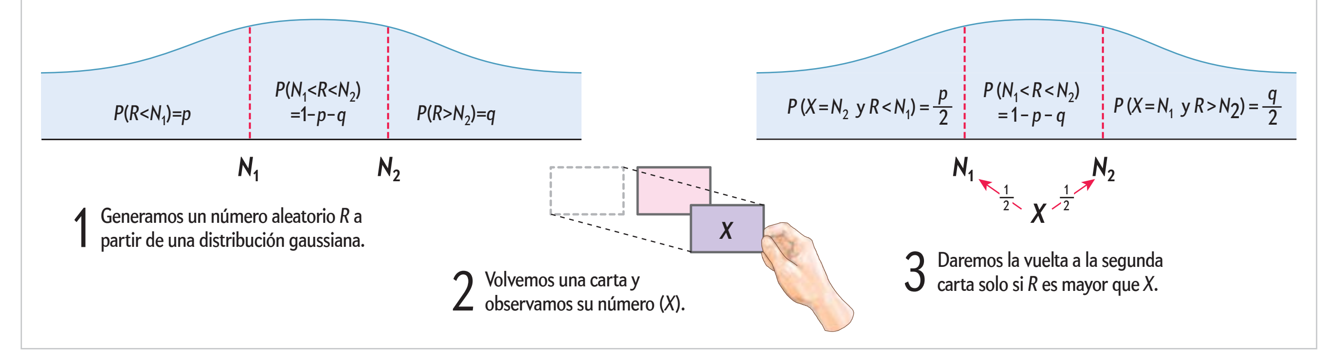
3 Nos detendremos en la cuarta solo si es la mayor de las cuatro.



4 En caso contrario, nos plantaremos al extraer un boleto que contenga uno de los dos números más altos aparecidos hasta el momento.

El curioso caso de *N* = 2

¿Qué ocurre si solo hay dos números ocultos? Por sorprendente que parezca, generar un número aleatorio y emplearlo como «estimador» del número que muestre la primera tarjeta nos ayuda a ganar en más de la mitad de las ocasiones.



1 Generamos un número aleatorio *R* a partir de una distribución gaussiana.

2 Volvemos una carta y observamos su número (*X*).

3 Daremos la vuelta a la segunda carta solo si *R* es mayor que *X*.

TOM DUNNE Y STEPHANIE FREESE/*AMERICAN SCIENTIST*

Aunque muchos problemas de detención óptima han sido resueltos, quedan todavía cuestiones pendientes cuyo planteamiento es de una sencillez más que seductora

mostraron que dicha manera de proceder constituye la mejor estrategia posible y que, además, garantiza la victoria en un 37 por ciento de las ocasiones. En general, si N es el número de boletos, tras observar a N/e de ellos (donde e es la base de los logaritmos naturales, $e = 2{,}71828...$), nos aseguramos la victoria con una probabilidad de $1/e \approx 0{,}37$, con independencia del número de papeletas o de candidatos. (Nótese que la estrategia anterior garantizaba el éxito en al menos 1/4 de las veces, también sin importar la cantidad de papeletas.)

En ocasiones, el objetivo consiste en acertar no con el mayor número de todos, sino que basta con dar con uno de los k más altos. En los Juegos Olímpicos, por ejemplo, para subir al podio basta con situarse entre los tres primeros; es decir, $k = 3$. Jugar a «todo o nada» (conseguir la medalla de oro o, en el caso anterior, el número más alto) se corresponde con el caso $k = 1$. La mejor estrategia para dar con uno de los k números mayores es similar a la anterior. Primero habremos de examinar un número dado de boletos, sin detenernos en ninguno de ellos. De este modo dispondremos de una base de referencia con la que trabajar. Después, habremos de seguir analizando números durante cierto período de tiempo fijo, y nos detendremos si para entonces aparece un récord. En tal caso, dado que el récord representa el mayor de entre todos los números aparecidos hasta el momento, es factible que se encuentre entre uno de los k números más altos. Si durante dicha ronda no aparece ningún récord, comenzaremos otra en la que nos detendremos cuando extraigamos uno de los dos números más altos hasta el momento, y así sucesivamente. En el caso para $k = 2$, el método asegura la victoria con una probabilidad de, al menos, el 57 por ciento. Para valores bajos de N la probabilidad es aún mayor. En el caso de $N = 7$ y $k = 2$, por ejemplo, la estrategia óptima garantiza la victoria en dos de cada tres ocasiones (*véase el recuadro* «¿Cuándo parar?»).

LA SORPRESA DE $N = 2$

Supongamos ahora que debemos decidir cuándo parar en el caso en que solo hay dos tiras de papel. Le damos la vuelta a una de ellas y observamos su número. Ahora hemos de juzgar si es mayor o menor que el número que esconde el segundo boleto. Lo sorprendente de este caso es que, según un argumento debido a David Blackwell (antiguo profesor en la Universidad de California en Berkeley, fallecido en 2010) resulta posible ganar en más de la mitad de las ocasiones. Desde luego, acertaremos la mitad de las veces si nos detenemos siempre en el primer número, y también si nos decidimos de manera sistemática por el segundo. Ninguna de estas estrategias requiere tener en cuenta el valor de los números. Pero, para ganar en más de la mitad de las ocasiones, habría que saber cómo emplear la información que nos proporciona el primer número para decidir si continuamos o no. Para tranquilidad del lector: en su momento, muchos matemáticos también dudamos de que algo así fuese posible.

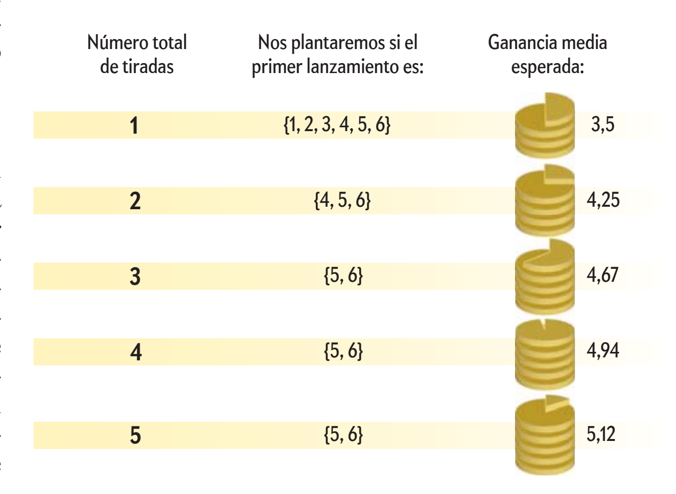
He aquí una regla para acertar en más de la mitad de las ocasiones. En primer lugar, con un ordenador u otro dispositivo, generaremos un número aleatorio R. Después daremos la vuelta a uno de los boletos. Llamemos X al numero que en él aparece: si $R < X$, nos plantaremos con la primera tarjeta, pero si $R > X$, levantaremos la segunda. ¿Cómo puede una estrategia tan simple garantizar el acierto en más de la mitad de las ocasiones?

Llamemos N_1 al menor de los números escritos en las tarjetas y N_2 al mayor de ellos. Sea $p = P(R < N_1)$ la probabilidad de que R resulte menor que N_1, y sea $q = P(R > N_2)$. Sabemos que la probabilidad de que R se halle comprendido entre ambos números es $1 - p - q$, y también que $P(X = N_1) = P(X = N_2) = 1/2$ (*véase el recuadro* «¿Cuándo parar?»).

Ahora, si R es menor que ambos números (lo que ocurrirá con probabilidad p), nos plantaremos con la primera tarjeta, por lo que ganaremos siempre que $X = N_2$. Ello contribuye con un total de $p/2$ a nuestras posibilidades de victoria. Del mismo modo, acertaremos la mitad de las veces que $R > N_2$ (en tal caso, cuando $X = N_1$); es decir, con una probabilidad de $q/2$. Pero si R se halla comprendido entre ambos números, ganaremos siempre. Ello nos proporciona el margen favorable necesario, puesto que $p/2 + q/2 + 1 - p - q = 1/2 + (1 - p - q)/2$ es mayor que 1/2, ya que $1 - p - q$ es mayor que 0, siempre que N_1 sea distinto N_2.

Por ejemplo, si el número aleatorio R fuese generado a partir de una distribución gaussiana normal estándar (es decir, centrada en el 0 y con una desviación típica igual a 1) y los dos números ocultos fueran 1 y π, el método nos daría un valor de p cercano a 0,8413 y un valor de q de 0,0008. En tal caso, la estrategia descrita arriba resultaría en una probabilidad de éxito superior al 57 por ciento.

Es cierto que si el apostante que escribe los números conoce nuestra estrategia, puede contrarrestarla y reducir la probabilidad de acierto escribiendo números muy próximos entre sí. En cambio, si nuestro oponente no puede escoger los números con total libertad, sino que se ve obligado a elegir un número entero comprendido entre 1 y 100, por ejemplo, no podrá reducir nuestra probabilidad de acierto. En tal caso, parece obvio que nunca elegirá el 1, ya que, si apareciese, sabríamos que con-



Inducción regresiva: **Hemos de lanzar un dado de seis caras un máximo de *N* veces. Podemos detenernos cuando deseemos; al hacerlo, recibiremos un número de monedas de oro igual al número que muestre el dado en ese momento. ¿Cómo maximizar las ganancias?**

STEPHANIE FREESE/*AMERICAN SCIENTIST*

tinuar nos garantizaría la victoria. Pero entonces tampoco debería escribir nunca un 2, y así sucesivamente. Los lectores interesados están invitados a descubrir por ellos mismos la estrategia óptima en este caso y qué promedio de aciertos (mayor que 1/2) asegura esta.

INDUCCIÓN REGRESIVA

Hasta ahora debíamos decidir sin saber nada sobre los futuros valores. Imaginemos ahora el caso contrario: disponemos de toda la información, por lo que nos es posible conocer todas las observaciones potenciales futuras y sus respectivas probabilidades. Al igual que Cardano, Fermat y Pascal, consideraremos el juego que consiste en lanzar un máximo de cinco veces un dado de seis caras. Podremos detenernos cuando deseemos; al hacerlo, recibiremos un número de monedas de oro igual al número que muestre el dado en ese momento.

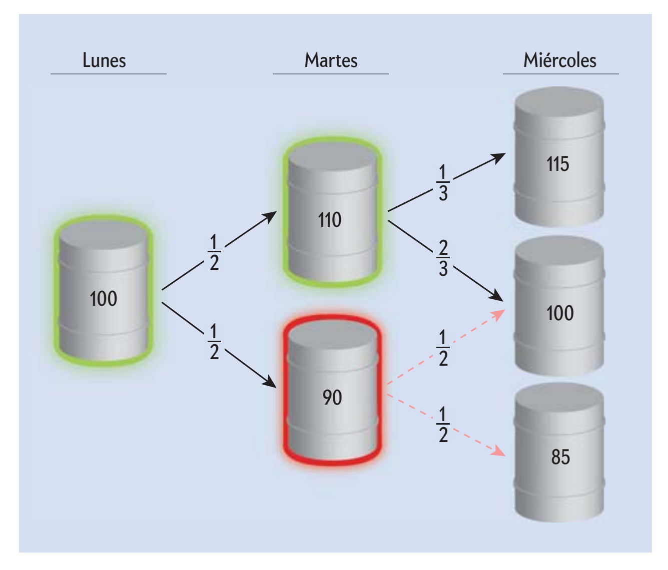
A diferencia del problema del matrimonio, en el que carecíamos de información sobre los candidatos, en este caso conocemos todo. Los valores de cada lanzamiento serán 1, 2, 3, 4, 5 o 6, y la probabilidad de obtener cualquiera de ellos es 1/6. Nuestro objetivo consiste en hallar una regla de detención que maximice el premio que, en promedio, aspiramos a ganar.

Si nos detuviéramos siempre tras el primer lanzamiento, el beneficio sería el valor esperado de una variable aleatoria que toma los valores 1, 2, 3, 4, 5 y 6 con probabilidades de 1/6. Una de cada seis veces ganaríamos 1 moneda, una de cada seis veces conseguiríamos 2, etcétera. El beneficio promedio al abandonar la partida tras el primer lanzamiento vendría dado, por tanto, por $1 \cdot (1/6) + 2 \cdot (1/6) + 3 \cdot (1/6) + 4 \cdot (1/6) + 5 \cdot (1/6) + 6 \cdot (1/6) = 3{,}5$ monedas de oro. Pero queda claro que, si en el primer lanzamiento obtenemos un 1, deberíamos continuar, mientras que, si damos con un 6, detenernos parece la mejor opción. ¿Y si aparece un 5 en la primera mano? ¿Deberíamos parar? El método de la inducción regresiva constituye una poderosa técnica para resolver este tipo de casos.

Sin duda, la mejor opción consiste en retirarnos tras la primera tirada si el valor obtenido es mayor que el valor esperado en caso de continuar. Pero evaluar este último caso nos sitúa al comienzo de un nuevo juego: uno en el que solo se nos permite un máximo de cuatro rondas, cuyo valor esperado también desconocemos. De manera similar, la estrategia óptima en ese juego de cuatro lanzamientos consistiría en detenernos tras la primera tirada siempre que el resultado fuese mayor que la cantidad que esperamos ganar en caso de continuar. Y ello nos sitúa ahora ante un juego en el que disponemos de un máximo de tres lanzamientos.

Este razonamiento regresivo nos conduce a una estrategia que sí conocemos. En un problema de una única tirada, solo cabe una estrategia: lanzar el dado una vez. Y ya sabemos que, en tal caso, el beneficio esperado asciende 3,5 monedas. Ello nos dice cuál es la estrategia óptima en el problema de dos lanzamientos: detenernos tras el primero de ellos si la puntuación es mayor que 3,5. En otras palabras, abandonar en caso de obtener un 4, un 5, o un 6, y continuar en los demás casos.

El razonamiento anterior nos permite calcular el beneficio promedio en el problema de los dos lanzamientos. En la primera tirada, la probabilidad de obtener un 4, un 5 o un 6 es de 1/6 en cada caso. De ser así, nos detendremos y recibiremos, respectivamente, 4, 5 o 6 monedas. De lo contrario (cuando el primer lanzamiento resulte en un 1, un 2 o un 3; esto es, la mitad de las veces), continuaremos, en cuyo caso sabemos que el



¿Cuándo comprar? **La figura ilustra un ejemplo en el que el precio de la energía fluctúa los martes y miércoles. Los precios posibles figuran con sus probabilidades respectivas en función del precio del día anterior. La inducción regresiva nos dice cuándo comprar: no hacerlo nunca en lunes, comprar los martes solo si el precio baja a 90 y, si no, esperar al miércoles.**

STEPHANIE FREESE/*AMERICAN SCIENTIST*

promedio de monedas que recibiremos asciende a 3,5. Por lo tanto, el beneficio esperado en el juego de las dos tiradas es $4 \cdot (1/6) + 5 \cdot (1/6) + 6 \cdot (1/6) + (1/2) \cdot (3{,}5) = 4{,}25$. Ello nos indica la estrategia óptima para el problema de las tres tiradas: detenernos si en la primera obtenemos un 5 o un 6 y, de no ser así, continuar y abandonar el juego solo si el segundo lanzamiento resulta en un 4, un 5 o un 6. Si ello tampoco ocurre, proseguiremos hasta el final.

Al iterar hacia atrás el mismo tipo de estrategia podemos resolver el problema original de las cinco tiradas. Su solución resulta ser la siguiente: detenernos tras el primer lanzamiento solo si obtenemos un 5 o un 6; plantarnos tras el segundo ante un 5 o un 6; en el tercero, también si el resultado es 5 o 6; en el cuarto solo si obtenemos 4, 5 o 6 y, en caso contrario, jugar la última ronda. Esta estrategia es mejor que cualquier otra y garantiza una ganancia promedio de 5,12 monedas de oro. En un juego de seis lanzamientos, tendríamos que detenernos tras el primero de ellos solo en caso de obtener un 6.

El método de inducción regresiva es muy versátil. También puede aplicarse a problemas en los que los sucesos no son independientes y a aquellos en los que el objetivo consiste en minimizar un valor esperado, como cuando hemos de afrontar costes. Imaginemos ahora que una compañía debe contratar el suministro semanal de energía los lunes, martes o miércoles. Y supongamos también que los precios futuros pueden estimarse en razón de las estadísticas pasadas. Por ejemplo, los lunes existe la oportunidad de adquirir energía a un coste de 100. Pero sabemos que, en tal caso, el precio de los martes puede situarse en 110 o en 90, con probabilidades respectivas del 50 por ciento. Además, gracias nuestra experiencia, sabemos que cuando los martes el precio asciende a 110, existe una probabilidad de 1/3 de que el miércoles la energía cueste 115, y una probabilidad de 2/3 de que el precio se fije en 100. Por otro lado, cuando los martes el precio de la energía es 90, los miércoles puede valer 85 o 100, con igual probabilidad.



Un problema abierto: Lanzamos repetidamente una moneda al aire tantas veces como deseemos y recibiremos una cantidad de monedas de oro igual a la fracción de caras que hayamos obtenido en el momento de detenernos. Este problema, de apariencia simple, aún carece de solución general: solo se conocen resultados cuantitativos para un número bajo de lanzamientos.

El método de inducción regresiva permite deducir que la regla óptima consiste en no comprar en aquellos martes en los que el precio se sitúe en 110. Ello se debe a que dicha cifra es mayor que el valor esperado para el miércoles: $(1/3) \cdot (115) + (2/3) \cdot (100) = 105$. De la misma manera, si el precio del martes se fija en 90, lo mejor es comprar. Al aplicar el método de inducción al lunes, y dado que 100 es mayor que el coste medio previsto en caso de esperar hasta el martes (a saber, $(1/2) \cdot (105) + (1/2) \cdot (90) = 97{,}5$), lo óptimo es no comprar los lunes.

Consideremos ahora el caso de poseer toda la información cuando nuestro objetivo consiste en detenernos en uno de los k valores más altos. Hasta hace un tiempo, se desconocían las mayores probabilidades de ganar en el caso general de una serie finita de variables aleatorias e independientes. Junto con Douglas Kennedy, de la Universidad de Cambridge, conseguimos resolver el problema. Para ello, nos valimos de métodos de inducción progresiva y regresiva, así como de una distribución conocida como «pirámides de Bernoulli». En dicha distribución, cada nueva variable aparece como la mejor o la peor de todas las observadas hasta el momento (por ejemplo, la primera variable aleatoria toma los valores +1 o –1, con ciertas probabilidades; la segunda, +2 o –2, y así sucesivamente). Demostramos que, para cada secuencia finita de variables aleatorias independientes, existe siempre una regla que logra dar con el valor máximo con una probabilidad mayor o igual que $1/e$. Otra estrategia permite detener el proceso en uno de los dos valores más altos con una probabilidad de, al menos, $e^{-\sqrt{2}}(1+\sqrt{2})$, la cual resulta ser la mejor posible. También existen fórmulas similares para las probabilidades correspondientes a la detención en uno de los k valores más altos.

Hagamos notar que los problemas como el expuesto arriba no pueden resolverse con ayuda de un ordenador. Todas las cuestiones aquí descritas requieren, de hecho, las técnicas tradicionales del matemático: el análisis de ejemplos simples con lápiz y papel, la solución de los casos de dos, tres y cuatro incógnitas hasta dar con el patrón general y, finalmente, el desarrollo de una demostración formal de la solución. Los ordenadores resultan de extraordinaria utilidad cuando se trata de procesar una gran cantidad de datos, como ocurre en los casos de inducción regresiva. Sin embargo, no suelen aportar nada significativo a los descubrimientos que hacen avanzar la teoría de la probabilidad. Reconsidere por ejemplo la solución al problema de las dos tarjetas descrito arriba: ¿cómo podría alguien programar un ordenador para que diese con semejante estrategia?

INFORMACIÓN INCOMPLETA

Los casos en los que falta información se encuentran entre los más complejos. A menudo, no conocemos cuántos candidatos se presentarán a una oferta de empleo, ni tampoco las probabilidades de los futuros valores bursátiles. En tales casos, uno de los métodos de solución se basa en utilizar las aplicaciones de la teoría de los juegos de «suma cero» entre dos personas, en los que el problema de la detención óptima puede reformularse como una partida contra un oponente (llamémosle «Dios» o «madre naturaleza») facultado para asignar, a su antojo, los valores y las probabilidades.

Junto a Ulrich Krengel, de la Universidad de Gotinga, empleamos dicha técnica para hallar la estrategia óptima en el problema del matrimonio cuando tan solo se conoce una cota al número de candidatos. Como ejemplo, consideremos el siguiente caso: nuestro objetivo consiste en dar con el número más alto de entre todos los inscritos en las bolas contenidas en una bolsa opaca. Dentro de la bolsa sabemos que hay un mínimo de una bola y un máximo de 5. Si continuamos extrayendo bolas hasta descubrir que ya no queda ninguna, perderemos. Junto con Krengel, demostramos que la estrategia óptima en un problema así consiste en extraer una bola y detenerse, con una probabilidad de ganar de 26/75. Si no nos detenemos en la primera bola, debemos ir a por la segunda, en caso de que la haya. Si el número

STEPHANIE FREESE/*AMERICAN SCIENTIST*

inscrito en ella es mayor que el primero, debemos detenernos ahí, con una probabilidad de 26/49. De no hacerlo, continuaremos hasta detenernos en el próximo récord (o hasta que hayamos agotado las bolas o nos veamos obligados a elegir el número de la quinta). Este proceder asegura una probabilidad de 26/75 de detenernos en el número más alto, con independencia del número de bolas que haya en la bolsa.

No existe una estrategia mejor que la anterior. Hallamos las fórmulas y estrategias exactas para todos los valores posibles del número máximo de bolas, y las probabilidades de éxito resultaron sorprendentemente elevadas. Por ejemplo, incluso en el caso en que solo sabemos que la bolsa contiene entre una y 100 bolas, sigue siendo posible ganar en torno al 20 por ciento de las veces. El mismo método puede aplicarse en numerosos problemas de la vida real, como sería la situación de una empresa que desea contratar al mejor comercial disponible y conoce el número máximo de candidatos al puesto, pero ignora cuántos han aceptado ya otro empleo.

Otro tipo de problema de detención óptima con información incompleta es el siguiente: el observador conoce la longitud de la secuencia (sea, por ejemplo, el número de bolas), pero solo dispone de parte de la información sobre los valores aleatorios inscritos en ellas. En vez de carecer de toda información, o en lugar de conocer todos los valores posibles y sus respectivas probabilidades, podría conocer solo el valor medio y la desviación típica de las variables. En el caso de variables aleatorias independientes, junto con Frans Boshuizen, de la Universidad Libre de Amsterdam, aplicamos la teoría de juegos y el *balayage* («barrido» o traslado de la función de probabilidad desde su valor central hacia uno y otro extremo) para determinar la estrategia de detención óptima. No obstante, no resulta posible generalizar tales razonamientos al resto de problemas de detención con información incompleta.

PROBLEMAS ABIERTOS

Aunque muchos problemas de detención óptima han sido resueltos, quedan todavía cuestiones pendientes cuyo planteamiento es de una sencillez más que seductora. Entre ellos, existen algunos en los que se dispone incluso de toda la información. He aquí mi favorito: lanzamos una moneda al aire tantas veces como deseemos. El premio consistirá en una cantidad de monedas de oro igual a la fracción de caras que hayamos obtenido en el momento de detenernos. De esta manera, si en la primera tirada sale cara y paramos, recibiremos una moneda de oro. Desde luego, en tanto que nunca podremos lograr más del 100 por cien de caras, lo óptimo sería detenernos aquí. Pero, si en el primer lanzamiento obtenemos una cruz, lo mejor será continuar, ya que en caso contrario no obtendríamos premio alguno.

Supongamos que en el primer lanzamiento obtenemos una cruz y, en el segundo, una cara. Podremos entonces abandonar y recibir media moneda de oro, o bien continuar. Si reflexionamos unos instantes, apreciaremos que plantarnos con media moneda de oro (o con menos) nunca constituye la mejor opción. La ley de los grandes números establece que, en la medida en que vayamos repitiendo los lanzamientos, la proporción de caras tenderá al 50 por ciento y oscilará por encima y por debajo en torno a ese porcentaje. Abandonar con un 50 por ciento de caras es, sencillamente, poco ambicioso.

Puede demostrarse —con algo más de dificultad— que la mejor elección consiste en plantarnos tras el tercer lanzamiento en caso de haber obtenido la secuencia cruz-cara-cara, y también que detenernos tras la primera ocasión en que hayamos acumulado más caras que cruces es, por un tiempo, la mejor alternativa. Pero abandonar tras el primer lanzamiento que nos brinde una cara más que las cruces acumuladas no resulta óptimo para siempre. Transcurrido cierto tiempo crítico, solo deberemos detenernos cuando tengamos dos caras más que cruces; y después de un segundo lapso de tiempo, habremos de parar solo cuando el número de caras supere en tres al de cruces.

En el área de las finanzas, la detención óptima requiere nuevas ideas y avances que incluyan estimaciones más precisas sobre el riesgo de error en los modelos matemáticos

La demostración de las reglas anteriores se basa en la ley del logaritmo iterado y no resulta nada sencilla: a día de hoy, aún se desconoce la lista completa de tiempos críticos. La inducción regresiva no es aplicable al problema, ya que, en principio, la secuencia carece de fin y, por consiguiente, no existe un momento futuro desde el que ir retrocediendo de forma inductiva. En fecha reciente, Wolfgang Stadje, de la Universidad de Osnabrück, logró una serie de progresos al respecto. Sin embargo, y tras más de un siglo de avances en la teoría de la probabilidad, aún se desconoce la regla óptima para todas las secuencias de caras y cruces.

Con todo, el estudio general de la detención óptima progresa a buen ritmo, sobre todo gracias a sus aplicaciones a los mercados financieros. De hecho, algunos expertos opinan que la disciplina ha evolucionado demasiado rápido y que los modelos informáticos de fijación de precios en opciones y derivados (en esencia, problemas de detención óptima) constituyen la principal causa de la crisis económica actual. No obstante, y aun en el caso de que así fuese, el error no radica en la disciplina. Al igual que Steven Shreve, de la Universidad Carnegie-Mellon, atribuyo a los responsables de las tomas de decisiones la culpa de haber confiado de manera ciega en las predicciones de los modelos informáticos. De hecho, lo que requiere el campo de la detención óptima son nuevas ideas y avances, que también incluyan estimaciones más precisas sobre el riesgo de error en los modelos matemáticos. Y no solo para calcular el momento en el que el estado debería interrumpir los rescates bancarios, sino también para resolver otros problemas, como el de decidir cuándo dejar de consumir combustibles fósiles o de almacenar armamento nuclear.

PARA SABER MÁS

The secretary problem and its extensions: A review. P. R. Freeman en *International Statistical Review*, vol. 51, págs. 189-208, 1983.
Great expectations: The theory of optimal stopping. Y. Chow, H. Robbins y D. Siegmund. Dover Publications; Mineola, N.Y., 1991.
Minimax-optimal stop rules and distributions in marriage problems. T. Hill y U. Krengel en *Annals of Probability*, vol. 19, págs. 342–353, 1992.
One observation behind two-envelope problems. D. Samet, I. Samet y D. Schmeidler en *American Mathematical Monthly*, vol. 111, págs. 347–351, 2004.
Optimal stopping with applications. S. Jacka *et al*. en *Stochastics*, vol. 79, págs. 1–4, 2007.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Química de la combustión

Aunque el agua se muestra eficaz para extinguir el fuego, en un recinto cerrado puede provocar efectos catastróficos

Una colilla mal apagada prende un papel, el cual inflama los visillos y después la biblioteca comienza a arder. Desde luego, la situación no es buena, pero la verdadera catástrofe puede sobrevenir si se desencadena una combustión súbita generalizada: la inflamación simultánea de muebles, paredes y gases combustibles en toda la habitación. ¿Es posible evitar semejante desastre? Sí, pero siempre que empleemos el agua de la manera correcta.

¿Cómo apagar el fuego provocado en un bosque por una imprudente barbacoa? Podemos esperar hasta que, a falta de combustible, las llamas se extingan por sí solas. También funcionará cubrirlas de arena para privarlas de oxígeno o enfriarlas con agua. La eficacia de esos tres procedimientos se explica por la naturaleza de la combustión: una reacción química entre un cuerpo combustible y un agente comburente, la cual se sostiene a sí misma como consecuencia del calor que genera. A falta de un elemento de la tríada combustible-comburente-calor, el fuego se extingue. Cuando este se propaga de tal modo que ya no es posible eliminar los combustibles ni sofocar las llamas, los bomberos atacan el calor arrojando agua.

¿Por qué resulta eficaz el enfriamiento a la hora de extinguir un fuego? El calor mantiene el fuego de dos maneras: por una parte, permite que se produzcan las reacciones químicas de la combustión; por otra, libera sustancias combustibles. Expliquémonos.

Pirólisis y combustión

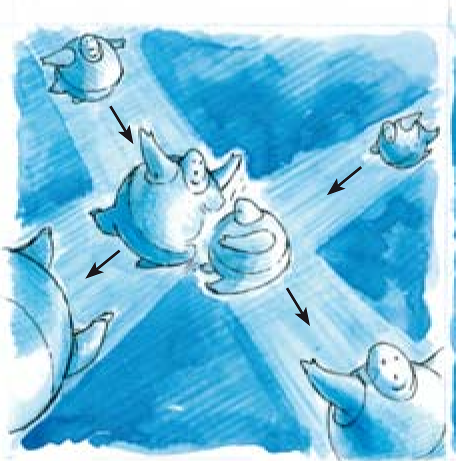
Una reacción química se desencadena solo si la energía cinética de las moléculas supera cierto umbral; además, la reacción es tanto más probable cuanto más se sobrepasa dicho valor. Dado que la energía cinética media de las moléculas es proporcional a la temperatura, esta debe exceder un valor determinado para que sobrevenga la combustión. El papel, inerte en condiciones normales, se inflama de manera espontánea cuando la temperatura rebasa los 451 grados Fahrenheit (233 grados centígrados), valor que inspiró a Ray Bradbury para titular su famosa novela. Una vez desencadenada, la combustión libera más energía de la que consume; ese exceso de energía se recupera en forma de calor y activa nuevas reacciones.

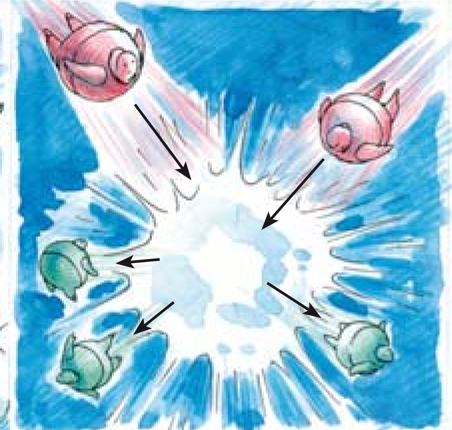
¿Qué efecto ejerce el calor sobre los materiales combustibles? Coloquemos un leño en una chimenea. Aunque la madera se calentará, su temperatura no rebasará los 100 grados centígrados hasta que toda el agua que contiene se haya evaporado. Una vez seca, su temperatura aumentará, las moléculas de celulosa se

BRUNO VACARO



Tres maneras de extinguir un fuego: Privarlo de material inflamable, rociarlo con agua o cubrirlo de arena. Se trata de cortar el aporte de combustible, de calor o de comburente (oxígeno).





Reacción entre combustible y comburente: Si ambos reactivos chocan con muy poca energía cinética, rebotan sin que su estado se altere. Solo cuando la energía del choque supera cierto umbral, las moléculas se transforman y se liberan los productos de combustión.

descompondrán y liberarán gases combustibles, como hidrógeno y monóxido de carbono.

Ese proceso, denominado pirólisis, consume energía. Sin embargo, el calor generado por las llamas supera con mucho ese gasto energético. La combustión, la reacción entre los gases combustibles y el oxígeno atmosférico, libera una gran cantidad de energía; en el caso de la madera, del orden de 20 megajulios por kilogramo. Los incendios forestales más intensos llegan a generar una decena de megavatios por metro de frente de fuego; un armario de pino ardiendo puede liberar una potencia de dos megavatios.

Para apagar un fuego hay que enfriarlo con mayor rapidez que con la que se calienta. La eficacia del agua al respecto es proverbial: posee la mayor capacidad calorífica de entre todas las sustancias naturales y el mayor calor latente de vaporización de todos los líquidos. Para calentar un litro de agua de 15 a 100 grados centígrados se requieren 355 kilojulios (85 kilocalorías, una por cada grado que deseemos elevar la temperatura del agua); una vez a 100 grados, hay que aportar unos 2250 kilojulios para convertirla en vapor. Por tanto, la capacidad de enfriamiento del agua asciende, en teoría, a 2,6 megavatios para un caudal de un litro por segundo.

En la práctica, un chorro continuo aplicado sobre el fuego absorbe un tercio de esa potencia, ya que se vaporiza solo una fracción del agua; gran parte se conserva en estado líquido. En consecuencia, para contrarrestar la combustión de nuestro armario de pino se necesitarían unos 200 litros de agua por minuto. Ello no supone ningún problema para una patrulla de bomberos, cuyos coches transportan hasta 3000 litros y disponen de bombas que pueden descargar 1000 litros de agua por minuto.

En las ciudades, la mayoría de los incendios se apagan con menos de 400 litros. Pero los incendios de mayores dimensiones, como los forestales, no se dejan dominar con facilidad por los camiones de bomberos; un incendio de un gigavatio requeriría el concurso de varias decenas de coches. En tal caso resultan preferibles las avionetas, las cuales pueden verter unos 6000 litros en pocos segundos; es decir, poseen una potencia de enfriamiento superior al gigavatio.

Vemos pues que resulta esencial disponer de una gran cantidad de agua. Pero, en ocasiones, ello no basta para combatir un incendio de interior. En un recinto cerrado, la acumulación de humo y calor puede modificar por completo la naturaleza del proceso. Cuando el fuego se propaga en una habitación, la temperatura aumenta sobremanera y los objetos incandescentes acaban por transferir energía a los demás mediante la emisión de radiación infrarroja. La pirólisis desprende humos y gases combustibles muy calientes que se acumulan en el techo, donde la temperatura puede llegar a los 300 grados centígrados.

A falta de comburente, no todos los gases arden. Pero esa situación es inestable: un aporte de oxígeno los inflamará y desencadenará la temida combustión súbita generalizada. Si la temperatura bajo el techo aumenta aún más y alcanza los 500 grados, ello bastará para provocar la inflamación espontánea de numerosos materiales. En una fracción de segundo sobrevendrá el abrasamiento total, las llamas invadirán la habitación y la temperatura subirá hasta los 1000 grados.



Abrasamiento total: Para evitar la combustión súbita generalizada en un local cerrado, hay que lanzar cantidades moderadas de agua en forma de gotas dispersas. Al evaporarse, las gotas enfrían los gases combustibles acumulados en el techo.

Evitar el exceso de agua

¿Cómo prevenir semejante catástrofe? Una cantidad exagerada de agua no ayuda: si se genera demasiado vapor de agua, este empujará hacia el exterior el humo y los gases combustibles. Una vez en contacto con el aire fresco, abundante en oxígeno, esos gases arderían inmediatamente. El mejor procedimiento para evitarlo consiste en enfriar los gases con agua en cantidad moderada y esparcida de manera intermitente en un chorro difuso. De esta manera, la vaporización de las gotas de agua, incluso antes de llegar a las paredes o al suelo, rebajará la temperatura de los gases combustibles.

Al enfriarse, los gases reducen su volumen. Ello compensa con creces el espacio ocupado por el vapor de agua y disminuye la presión total en la sala. Se evita así que los gases inflamables sean expulsados al exterior y, además, mejora la visibilidad en la habitación. No obstante, la operación es delicada: una reducción demasiado súbita del volumen ocupado por los gases combustibles puede provocar una disminución drástica de la presión. Ello arrastraría aire desde el exterior hacia el interior de la habitación, en cuyo caso también podría sobrevenir una combustión súbita provocada por la llegada de oxígeno. Es por ello que las nuevas técnicas contra incendios se reservan a los profesionales mejor equipados y con excelente preparación.

PARA SABER MÁS

Tactical flow rates for interior firefighting. Paul Grimwood, disponible en **www.firetactics.com**

Idées de physique. Blog de los autores, **http://blog.idphys.fr**

por Agustín Rayo y Alejandro Pérez Carballo

Agustín Rayo y **Alejandro Pérez Carballo** son miembros del departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



El programa de Woodin

Una respuesta a la paradoja de Russell

En 1902, el filósofo y matemático Gottlob Frege acababa de completar su obra maestra, *Los principios básicos de la aritmética*. Este trabajo magno prometía mostrar que la matemática entera podía ser derivada a partir de principios puramente lógicos. Una verdadera revolución.

Ocurrió, sin embargo, una tragedia. Cuando el segundo y último volumen de la obra ya se encontraba en prensa, Frege recibió una carta de Bertrand Russell, filósofo de la Universidad de Cambridge. Tras unas cuantas líneas en las que elogiaba el trabajo de Frege, la carta señalaba «una dificultad». Esa dificultad se conoce hoy con el nombre de *paradoja de Russell*. Sus consecuencias pueden compararse a la detonación de una bomba nuclear en los cimientos de la teoría de Frege.

Para explicar de qué trata la paradoja, primero necesitamos describir el proyecto de Frege. En terminología contemporánea, lo que Frege había construido era una teoría de conjuntos. Un conjunto consiste en una colección de objetos. El conjunto de los elefantes, por ejemplo, es una entidad matemática que tiene como miembros a todos los elefantes y solo a ellos; el conjunto de los volcanes se encuentra formado por todos los volcanes y solo por ellos.

Tal y como Frege entendía los conjuntos, a cualquier colección de objetos le correspondía un conjunto. Así como existe el conjunto de todos los elefantes y el de todos los volcanes, también existen conjuntos de objetos matemáticos: el conjunto de los números naturales, el de los números enteros o, también, el conjunto de todos los conjuntos. De manera más general, Frege creía que si las *F* constituyen entidades cualesquiera, existe un conjunto cuyos miembros son todas las *F* y solo ellas.

La paradoja de Russell

La paradoja de Russell demuestra que esta noción de conjunto es inconsistente. La idea es sencillísima. Comencemos con la observación de que, según Frege, hay conjuntos que no son miembros de sí mismos y, también, conjuntos que sí lo son. El conjunto de los elefantes no es miembro de sí mismo, porque todos sus miembros son elefantes, y los elefantes no son conjuntos. El conjunto de todos los conjuntos, en cambio, sí es miembro de sí mismo, ya que sus elementos son todos los conjuntos.

Para derivar la paradoja, Russell nos pide que consideremos el conjunto *R* cuyos elementos son todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos. Según Frege, ese conjunto debería existir. Debería contar entre sus miembros al conjunto de los elefantes (porque el conjunto de los elefantes no es miembro de sí mismo), pero no al conjunto de todos los conjuntos (porque este último sí es miembro de sí mismo).

¿Es *R* miembro de *R*? Supongamos en primer lugar que sí. Esto contradice su definición, según la cual ningún miembro de *R* es miembro de sí mismo. Asumamos por tanto que *R* no es miembro de *R*. Eso también contradice su definición, según la cual todo conjunto que no es miembro de sí mismo es miembro de *R*. El resultado conduce a una contradicción: *R* no puede ser miembro de sí mismo, pero tampoco puede no serlo. La conclusión hace insostenible la teoría de Frege.

A pesar de que la carta de Russell destruyó años de trabajo, Frege respondió con gran aplomo. Después de agradecer a Russell su interés por el proyecto, escribió: «Su descubrimiento de la contradicción me ha provocado una gran sorpresa, y casi diría consternación, pues ha sacudido los cimientos sobre los que tenía la intención de construir la aritmética. [...] He de reflexionar más en el asunto».

El resultado de esas reflexiones fue un apéndice —añadido al texto en el último momento— en el que Frege describió la paradoja e hizo lo que pudo por esbozar una solución. Por desgracia, nunca logró desarrollar el esbozo y terminó por abandonar el proyecto. A partir de entonces, filósofos y matemáticos han trabajado duro para encontrar una nueva concepción conjuntista: una que evite la paradoja de Russell, pero que sea lo bastante rica como para hacer matemáticas serias.

Jerarquía de conjuntos

Sabemos que hemos de abandonar la idea fundamental de Frege: no podemos decir, sin más, que a cualquier colección de objetos le corresponde un conjunto. Pero entonces, ¿qué? ¿Qué colecciones de objetos forman conjuntos y cuáles no? De acuerdo con la concepción dominante hoy día, los conjuntos forman una gran jerarquía. En el nivel 0 se encuentran los objetos comunes y corrientes, como los volcanes o los elefantes. Y en cada nivel superior se hallan los conjuntos que pueden construirse a partir de objetos que pertenecen a los niveles inferiores y que no han sido introducidos con anterioridad. En el nivel 1, por ejemplo, se encuentra el conjunto de los elefantes; en el nivel 2, el conjunto cuyo único miembro es el conjunto de elefantes. Después de los niveles 0, 1, 2, etc., viene el nivel ω —el primer nivel infinito de la jerarquía— y después de ω se suceden muchísimos niveles más.

Según esa concepción, los únicos conjuntos existentes son aquellos que viven en algún nivel de la jerarquía. Si una colección de objetos se extiende a lo largo de ella —es decir, si para cada nivel de la jerarquía hay un objeto de la colección que vive en algún nivel superior—, dicha colección no puede formar un conjunto. Ello evita la paradoja de Russell, ya que implica que *R* no existe (si existiera, se extendería a lo largo de la jerarquía). La concepción jerárquica de los conjuntos se muestra muy poderosa; tanto es así que el 99,9 por ciento de la matemática contemporánea puede reformularse en niveles relativamente bajos de la jerarquía.

Desafortunadamente, no disponemos de una caracterización completamente satisfactoria de la jerarquía. Existen dos

aspectos fundamentales que hemos de determinar: su altura y su anchura. La manera canónica de especificar la altura de la jerarquía emplea ciertos conjuntos denominados *cardinales grandes*: conjuntos infinitos, pero muchísimo mayores que el conjunto de los números naturales o el de los números reales [*véase* «El infinito», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. Al especificar qué cardinales grandes se encuentran en la jerarquía, imponemos una cota inferior a su altura. Según la postura mayoritaria, la jerarquía es tan alta «como sea posible»: si el supuesto de que un cardinal grande existe se muestra compatible con los axiomas usuales, entonces ese cardinal grande existe.

Lo que no queda tan claro es la manera de especificar su anchura. En un nivel dado de la jerarquía se encuentran todos los conjuntos que pueden construirse a partir de objetos que habitan en los niveles inferiores. Para especificar qué conjuntos contiene cada nivel, hemos de precisar qué se necesita para que un conjunto se pueda «formar a partir de objetos» de un nivel dado. Una opción (introducida, mas no apoyada, por el lógico Kurt Gödel) es la siguiente: un conjunto puede construirse a partir de los objetos de un nivel N si es posible definir dicho conjunto en el lenguaje de la teoría de conjuntos, nombrando solo objetos que viven en el nivel N. Esta manera de especificar la anchura de la jerarquía se conoce como *universo L*. Desafortunadamente, el universo L excluye a todos los cardinales grandes interesantes.

Hasta hace algunos años, la mayoría de los matemáticos creían que el hecho no era accidental. Su convicción se basaba en que cada manera de precisar la anchura de la jerarquía parecía imponer límites inaceptables a su altura.

Pero eso quizá cambie dentro de poco. Durante los últimos veinte años, un grupo de matemáticos liderados por Hugh Woodin, profesor de matemáticas en la Universidad de California en Berkeley, ha producido una serie de resultados que apuntan a una manera de especificar la anchura de la jerarquía de conjuntos que permite la existencia de todos los cardinales grandes conocidos hasta ahora. La idea se basa en asociar, a cada cardinal grande, una generalización del universo L que incluya a dicho cardinal. (Por supuesto, hay que precisar en qué consiste una «generalización» de L, pero la definición es bastante complicada.)

Si todo sale bien, lograremos asociar una generalización de L a cada cardinal grande que conocemos. Desafortunadamente, no estamos en posición de caracterizar a todos los cardinales grandes en la jerarquía conjuntista. ¿Cómo garantizar que a todos los cardinales grandes se les podría asociar una generalización semejante?

Uno de los resultados más sorprendentes de Woodin es que existe un punto de no retorno: un tipo de cardinal grande (llamado supercompacto) tal que, si logramos especificar la generalización de L correspondiente a ese cardinal, obtendremos una generalización de L para todos los demás. Lo anterior no nos proporcionaría una caracterización completa de la jerarquía, ya que no bastaría para determinar su altura. Pero sí nos daría una caracterización completa de su anchura, y ello supondría un logro extraordinario.

La paradoja de Russell dejó en ruinas el sueño de Frege, pero, poco a poco, avanzamos en el proceso de reconstrucción.



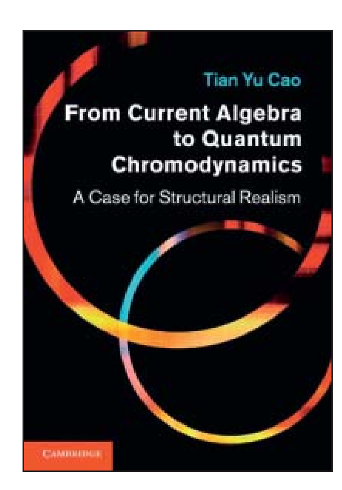


PARA SABER MÁS

From Frege to Gödel: A source book in mathematical logic, 1879-1931. J. van Heijenoort. Harvard University Press, 1977. Incluye la correspondencia entre Frege y Russell.

Intermediate Set Theory. F. R. Drake y D. Singh. John Wiley & Sons, 1996.

Los resultados más recientes de Woodin se recogen en **Suitable extender models**. El manuscrito aún no está disponible, pero algunos de sus resultados se encuentran en **http://bit.ly/Woodin**



FROM CURRENT ALGEBRA TO QUANTUM CHROMODYNAMICS. A CASE FOR STRUCTURAL REALISM.

Tian Yu Cao. Cambridge University Press; Cambridge, 2010.

Cromodinámica cuántica

Formulación conceptual y matemática

El advenimiento de la cromodinámica cuántica (QCD) constituyó uno de los acontecimientos más importantes de la ciencia del siglo xx. En los años cincuenta, se reputaban partículas elementales todos los hadrones, implicados en las interacciones fuertes. Comprendían los nucleones protón y neutrón y otros bariones, junto con los mesones pion, kaón y otros. Algunos pretendían que ciertas partículas fueran más básicas que el resto, de suerte que todos los hadrones pudieran derivarse de las fundamentales. Avalaron esa idea Enrico Fermi, C. N. Yang y S. Sakata. Pero predominaba lo que se dio en llamar «democracia nuclear» o «igualitarismo hadrónico», que proponía que todas las partículas eran elementales por igual, sin que hubiera una más fundamental que otra. En cuanto a la dinámica que gobernaba el comportamiento de los hadrones en los procesos de interacción fuerte, fracasaron los intentos de apoyarse sobre la teoría del mesón; era esta una versión afortunada de la teoría cuántica de campos. Partiendo de consideraciones dinámicas, Lev Landau, A. Abrikosov e I. Khalatnikov rechazaron el recurso a la teoría cuántica de campos para explicar las interacciones fuertes.

Mas a finales de los años setenta, los hadrones habían perdido ya su carácter de elementales. Constaban de quarks, que se mantenían unidos mediante gluones. Y la dinámica de las interacciones quark-gluon se interpretaba en el marco de la cromodinámica cuántica. Ese cambio radical en nuestra concepción de la ontología fundamental del mundo físico y su dinámica supuso un logro espectacular en la historia de la ciencia. Se recorren aquí, esquematizadas, las etapas que jalonaron la creación de la cromodinámica cuántica, centrándose en el intervalo que media entre la propuesta del álgebra de corrientes en 1962 y su formulación conceptual y matemática en 1972-73.

La noción de entidades inobservables (quarks y gluones) apareció como hipótesis. Más tarde se estableció la realidad de los rasgos estructurales de esas entidades, que se expresaban en los resultados del álgebra; aconteció tras contrastar la hipótesis con experimentos en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) sobre dispersiones inelásticas electrón-protón. Vino, en una tercera etapa, la creación de un marco conceptual coherente: la cromodinámica cuántica, que se construye para acomodar diversas restricciones experimentales y teóricas. Y, por último, se sometieron a comprobación experimental las predicciones de la teoría para asentar con firmeza la realidad de quarks y gluones. Aunque tales partículas pudieran no entenderse como partículas de Wigner, con masa y espín bien definidos y nuevas reglas de superselección basadas en la carga de color, la realidad física de esas partículas quedaba fuera de toda duda.

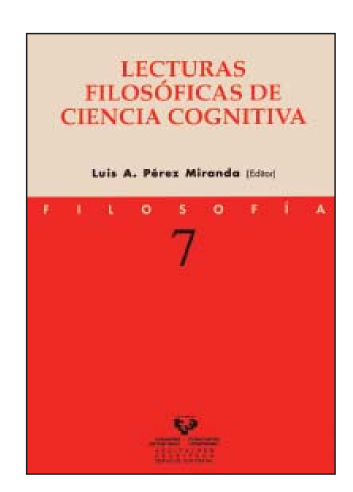
Nos hallamos ante un dominio propicio para reflexionar sobre la objetividad y el progreso del conocimiento científico; sobre todo, porque se ocupa de entidades teóricas inobservables: quarks y gluones. ¿Se trata de entidades reales e independientes de la voluntad humana o existen solamente como constructos mentales necesarios para organizar nuestros experimentos y predecir acontecimientos futuros? ¿Por qué hay constructos que son exitosos y otros que no lo son? El realista estructural responde que la razón se esconde en que la teoría implicada y sus entidades hipotéticas e inobservables deben guardar alguna relación con el mundo objetivo. Si eso acontece, podrá recuperarse el nexo entre teoría y pruebas, y sostenerse la continuidad del desarrollo científico. Una estructura, al tiempo que describe un patrón reconocido de fenómenos, podría también apuntar hacia la realidad de quarks y gluones, ambos en términos de una estructura profunda. La idea clave es que la realidad de la entidad inobservable puede inferirse de la realidad de su estructura.

El álgebra empleada fue la propuesta por Murray Gell-Mann en 1962; su principal hito: la regla de la suma de Stephen Adler para las interacciones entre el neutrino y el nucleón, avanzada en 1966. En efecto, la idea de Gell-Mann sobre el álgebra como hipótesis física pudo someterse a contrastación por la regla de la suma; resultó un éxito. La regla de Adler descerrajó la puerta que nos velaba el interior de los hadrones, a través de las colisiones leptón-hadrón; puso así el fundamento para ulteriores desarrollos, incluidos la hipótesis del escalonamiento y la idea del partón en el análisis de los experimentos del SLAC. La primera articulación clara de la cromodinámica cuántica la crearon Fritzsch y Gell-Mann en 1972. El álgebra de corrientes en 1962 constituyó un paso importante en la física de partículas. No existía entonces una teoría aceptada de las interacciones fuertes, ni se sabía cómo interaccionaban los hadrones entre sí. Cierto es que Hideki Yukawa había propuesto ya en 1935 una teoría de las interacciones fuertes. Para Yukawa, las interacciones nucleares, las únicas fuerzas fuertes conocidas en su tiempo, necesitaban la mediación del intercambio de mesones, en el mismo sentido en que las interacciones electromagnéticas precisaban la mediación del intercambio de fotones.

En otro orden, en 1947 la teoría de la renormalización evidenciaba su potencia en el cálculo del desplazamiento de Lamb. En dos años, el procedimiento de renormalización se integró en el cuadro general de la electrodinámica cuántica; los resultados infinitos, que a menudo aparecían en los cálculos de la electrodinámica cuántica, podían manejarse debidamente. Merced a ello, la hasta entonces discutible electrodinámica cuántica quedó rehabilitada y reconocida como un esquema conceptual y matemático para abordar los fenómenos microscópicos. Resultaba muy tentador, natural incluso, aplicar el mismo esquema a las interacciones nucleares en la forma de acoplamientos pion-nucleón de Yukawa, en paralelo con los acoplamientos electromagnéticos fotón-electrón, para comprender las fuerzas nucleares en términos de campos interaccionantes.

La noción de escalonamiento propuesta por James Bjorken en 1968 desempeñó un papel decisivo en el desarrollo conceptual de la física de partículas. Tendía un puente entre el esquema hipotético del álgebra de corrientes, con sus reglas de suma, y las pautas estructurales predichas y observables de comportamiento en la dispersión inelástica profunda leptón-nucleón. La idea subyacente del álgebra de corrientes consistía en explotar la simetría de las interacciones fuertes. Cuando se propuso dicha álgebra, acostumbraba definirse la simetría con respecto a propiedades estáticas de los hadrones: masa, espín, carga, isospín y extrañeza. Con los años, tras la confirmación del escalonamiento, la noción de simetría había cambiado. Entró en escena un nuevo componente, la simetría de aforo. El resultado fue la emergencia de un modelo quark-gluon para las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica. Crucial a la génesis de la cromodinámica cuántica fue por supuesto la formación de la noción de color como un nuevo número cuántico.

—Luis Alonso



LECTURAS FILOSÓFICAS DE CIENCIA COGNITIVA.

Dirigido por Luis A. Pérez Miranda. Universidad del País Vasco, Servicio Editorial; Bilbao, 2007.

Ciencia cognitiva

Textos fundamentales

Esta colección contiene la traducción al español de algunos de los artículos clásicos fundamentales de ciencia cognitiva, una disciplina que se centra en el estudio de la mente humana, los procesos cognitivos, el aprendizaje, la memoria, la capacidad de planear, la toma de decisiones, la inteligencia y el razonamiento. Este es un ámbito que, desde sus propias perspectivas, estudian también otras áreas del saber, como la psicología, la filosofía o las ciencias del aprendizaje. Pero lo que caracteriza a la ciencia cognitiva no es propiamente el objeto de investigación, sino el enfoque interdisciplinar.

Aunque los orígenes de la ciencia cognitiva pueden situarse a principios de los años setenta, fue a partir de mediados de los cincuenta cuando los intereses de investigadores de diversas disciplinas empezaron a converger en el estudio de los procesos cognitivos que operan sobre representaciones mentales. Se trata de un campo de interés común para la psicología, la lingüística, la neurociencia, la filosofía, la antropología y la inteligencia artificial. A pesar de su relativa juventud, la ciencia cognitiva ha avanzado de forma espectacular, especialmente en las últimas dos décadas. Los artículos cuya traducción se incluye en este volumen datan de mediados y finales de los ochenta; son algunos de los trabajos que definieron el ámbito de discusión e investigación en ciencia cognitiva y sentaron las bases de los avances posteriores. Todos ellos se centran en cuestiones fundamentales y de interés filosófico.

Seis de los diez artículos provienen del libro de Michael I. Posner *Foundations of Cognitive Science*, publicado en 1989, que contiene más de veinte capítulos. El primero de dichos textos, de Zenon Pylyshyn, se centra en el papel de la computación en la ciencia cognitiva. Otros dos, el de A. Newell, P. S. Rosenbloom y J. E. Laird, y el de David Rumelhart, discuten la arquitectura computacional que constituye la estructura de la cognición. El trabajo de P. N. Johnson-Laird discute la función de las representaciones mentales de la realidad externa y los procesos cognitivos que manipulan esas representaciones. Otros dos artículos se centran en el lenguaje como sistema de representación, desde la perspectiva de la lingüística computacional (Barbara Grosz) y con un enfoque lógico-semántico (Jon Barwise y John Etchemendy).

Un artículo de A. Sloman, de 1987, se acerca a la espinosa cuestión de la representación de las emociones y sentimientos. El volumen se completa con artículos de Donald Davidson y Daniel Dennett que presentan posiciones más críticas con respecto al papel de la computación en la explicación de los fenómenos cognitivos. Por fin, un artículo de Margaret Boden defiende los métodos computacionales frente a una crítica muy influyente del filósofo John Searle.

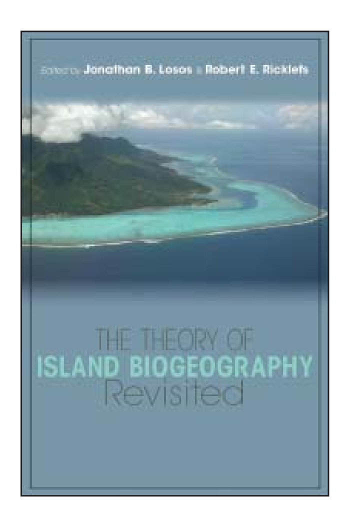
El volumen contiene un capítulo introductorio que muy posiblemente será de difícil comprensión para el neófito y que quizás hubiese podido ser un tanto más extenso. En este sentido, una descripción de los intereses y las aportaciones de las diferentes disciplinas involucradas en la ciencia cognitiva (como la que aporta el artículo de Herbert Simon y Craig Kaplan, en el primer capítulo del libro de Posner, y que no se incluye en esta antología) quizás hubiese contribuido a hacer la colección más accesible a los lectores sin formación en ciencia cognitiva.

La edición contiene algunas peculiaridades que pueden generar confusión y que deberían ser tenidas en cuenta si hay una segunda edición. En numerosos casos, los artículos tomados del libro de Posner hacen referencia a otros capítulos de ese volumen, pero sin adaptar la numeración al formato de la antología. Ello podría resolverse con notas a pie de página, que indicaran qué capítulos de la antología se corresponden con los citados.

En cualquier caso, el volumen proporciona una introducción de alto nivel a temas fundamentales de ciencia cognitiva, ya que los autores de los artículos son indiscutiblemente autoridades en su área de especialización. Los textos corresponden a trabajos de investigación, no meras introducciones de manual. Los traductores, por su parte, son todos especialistas en cuestiones relacionadas con la ciencia cognitiva y, más en particular, en las áreas específicas de los artículos que han traducido.

Esta antología será de utilidad para el lector interesado en familiarizarse con los temas fundamentales de esta activa disciplina a través de la lectura de trabajos pioneros, que tienen una perspectiva de interés filosófico y que desempeñaron una función importante a la hora de acotar el marco de las discusiones e investigaciones posteriores.

—Genoveva Martí



THE THEORY OF ISLAND BIOGEOGRAPHY REVISITED.

Dirigido por Jonathan B. Losos y Robert E. Ricklefs. Princeton University Press; Princeton, 2010.

Islas, especies y comunidades

Un libro fundamental para la ecología

Princeton University Press publicó a principios del año pasado una colección de artículos redactados por veintiséis investigadores, la inmensa mayoría anglosajones, con motivo del congreso celebrado en la Universidad de Harvard en 2007 para conmemorar el cuadragésimo aniversario de la publicación de otro libro. La obra homenajeada no es otra que *Theory of island biogeography*, firmada por dos genios de la talla de Robert H. MacArthur y Edward O. Wilson. Y el libro publicado en su honor no podía titularse sino *The theory of island biogeography revisited.*

Confieso mi desconfianza hacia los libros colectivos, especialmente cuando se trata del resultado de un congreso o reunión internacional. Las más de las veces resultan obras deslavazadas, simples colecciones de artículos inconexos carentes de un hilo conductor, a menudo con el aire de apresuramiento y provisionalidad característico de las comunicaciones a congresos. Prefiero la visión de conjunto aportada por textos escritos por un único autor o por un grupo pequeño trabajando conjuntamente e intentando transformar la información en conocimiento.

Afortunadamente, el libro coordinado por Losos y Ricklefs va más allá de una simple colección de artículos, aunque sin alcanzar el grado de integración propio de otro tipo de libros. A pesar de ello, su lectura resulta muy recomendable para todos aquellos dedicados a la zoología, la botánica o la ecología, pues contribuye a actualizar el legado de MacArthur y Wilson. No es, obviamente, un libro de divulgación dirigido al público en general. Tampoco está al alcance de la mayoría de los estudiantes, pues sin el bagaje histórico adecuado serán incapaces de captar su trascendencia.

Para comprender la relevancia de la teoría de la biogeografía insular de MacArthur y Wilson y la importancia del libro que nos ocupa es necesario conocer la situación de la ecología a principios de los años sesenta del siglo xx. Mientras los físicos dominaban el átomo y producían armas de una potencia inimaginable, los químicos inundaban el mundo con todo tipo de productos sintéticos, los médicos lograban controlar las infecciones gracias a los antibióticos y los bioquímicos descifraban la estructura de las proteínas y del material genético..., la mayor parte de los ecólogos se limitaba a descubrir que en las zonas encharcadas crecían plantas distintas de las presentes en las laderas pedregosas y otras trivialidades similares. En realidad, la ecología iba más allá, pero la ausencia de una base teórica sólida y de algún tipo de formulación matemática la hacía aparecer como una ciencia menor. Las famosas ecuaciones de Alfred Lotka y Vito Volterra, y la definición del nicho multidimensional de George Evelyn Hutchinson se habían revelado insuficientes. Era necesario ir más allá. La publicación de la teoría de MacArthur y Wilson, y el mítico experimento realizado inmediatamente después por Dan Simberloff y el propio Wilson en los cayos de Florida contribuyeron de forma decisiva a cambiar todo aquello, dando cuerpo a la ecología de comunidades tal como hoy la conocemos y otorgando al azar un papel fundamental.

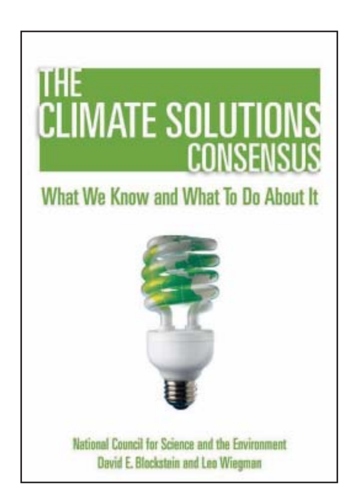
La teoría de MacArthur y Wilson era brillante, una sólida construcción teórica nacida de un profundo conocimiento de la historia natural, pero, al mismo tiempo alimentada por el deseo de trascender la anécdota, de ir más allá de las simples curiosidades del mundo animal. Su voluntad manifiesta era transformar la ecología en una ciencia predictiva, y ese mismo deseo espoleó a la generación posterior. Quienes realizaron su tesis doctoral en los EE.UU. y Gran Bretaña durante los años setenta y principios de los ochenta quedaron fascinados por la teoría, pero no la aceptaron de forma acrítica. El gráfico donde se concentraba la esencia de la teoría, el famoso diagrama donde el número de especies de una isla queda determinado por el punto de corte de las curvas que relacionan las dimensiones de la isla y su distancia al continente con las tasas de extinción y de colonización, ofrecía toda una serie de predicciones evaluables experimentalmente. Los hijos de una década profundamente inconformista quisieron ver si aquello era realmente cierto, retaron a sus maestros y se lanzaron a evaluar las predicciones de la teoría. El libro coordinado por Losos y Ricklefs es el resultado de aquel impulso.

Hoy conocemos mejor el funcionamiento de los ecosistemas que a finales de los años sesenta, la realidad se nos presenta más compleja y es necesario matizar algunos aspectos de la teoría original. Sin embargo, la rebeldía de los hijos no ha destronado todavía a los padres. MacArthur y Wilson siguen reinando, a la espera de que alguien con su misma talla intelectual sea capaz de transformar toda la información acumulada en los últimos 40 años en verdadero conocimiento. Stephen P. Hubbell estuvo a punto de lograrlo con la publicación, hace casi una década, de su teoría neutra de la biodiversidad y la biogeografía, pero sus resultados no parecen ser generalizables a todos los organismos. El libro que aquí reseñamos intenta ir un paso más allá, aunque la diversidad de autores le impide alcanzar la coherencia necesaria. Quedamos a la espera de una verdadera síntesis, pero mientras tanto los libros de Hubbell y de Losos y Ricklefs ofrecen una lectura estimulante. Falta, también, que alguien explique todo esto al público en general, pues su importancia trasciende en mucho el mero interés académico.

—*Luis Cardona*



JEFF SCHMALTZ, MODIS RAPID RESPONSE TEAM, NASA/GSFC



THE CLIMATE SOLUTIONS CONSENSUS: WHAT WE KNOW AND WHAT TO DO ABOUT IT.

David E. Blockstein y Leo Wiegman. National Council for Science and the Environment. Island Press; Washington, 2010.

En busca de soluciones de consenso

Treinta y cinco acciones para paliar el cambio climático

Durante los últimos años ha aparecido un gran número de títulos dirigidos a discutir la problemática del cambio climático. Algunos, unos pocos, han sido originales y han aportado visiones nuevas; otros, la mayoría, han sido más bien tópicos y con un discurso sin matices y casi sin interés. Los informes periódicos, compendios difícilmente digeribles excepto en porciones pequeñas y especializadas, del grupo de expertos de las Naciones Unidas representan, sin embargo, una referencia obligada, ya que establecen el estado del conocimiento consensuado sobre el problema.

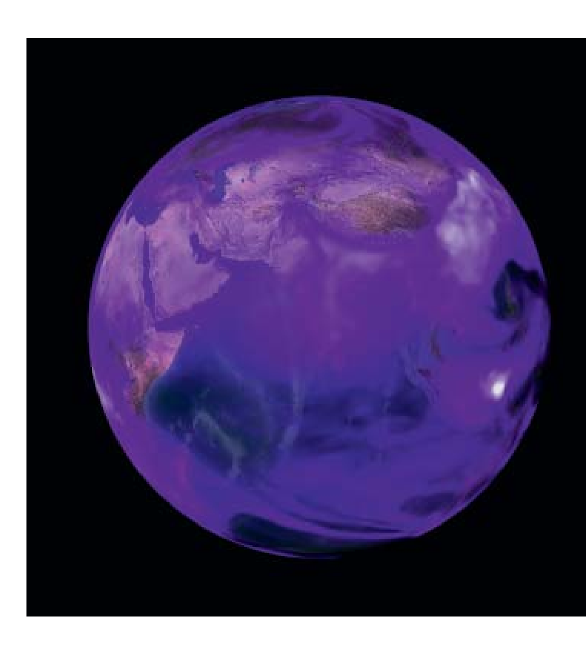
No obstante, la extensión de estos informes los hace poco útiles para la lectura de una persona interesada pero no necesariamente especialista en disciplinas ambientales. Por otro lado, la amplitud de la temática abarcada por la gestión del cambio climático produce que haya elementos terminológicos y conceptos poco conocidos en general que hay que aclarar. Hace bastantes años, la problemática del calentamiento de la atmósfera y el consecuente cambio de las condiciones ambientales eran cuestiones fundamentalmente científicas. Hoy, en cambio, habiéndose establecido sin apenas duda la incidencia de las actividades humanas en la composición de la atmósfera y las consecuencias de los cambios de la composición atmosférica en los patrones de funcionamiento del clima, buena parte del interés se sitúa en la gestión del problema, en las soluciones políticas y en las acciones que los ciudadanos podemos llevar a cabo para ayudar a resolver el problema.

Es muy ilustrativo el título del libro sobre el cual trata este comentario, el consenso sobre las soluciones en el clima, ya que precisamente un elemento básico es la difícil búsqueda de opiniones y de soluciones consensuadas. El libro se divide en cuatro partes, centradas en las siguientes cuestiones: qué se sabe sobre el clima, cómo pensar acerca de soluciones para el clima, cómo trabajar conjuntamente ahora y, por fin, treinta y cinco acciones inmediatas sobre el clima. Los autores han pretendido construir un texto claro y a la vez muy explicativo con numerosos recuadros y referencias tanto bibliográficas como de sitios web. El libro se apoya en recursos adicionales en la Red proporcionados por la organización que da soporte a la obra, el Consejo Nacional para la Ciencia y el Medio Ambiente de los Estados Unidos. Este patrocinio no es banal, ya que el libro expone datos y propone acciones pensadas esencialmente para los Estados Unidos.

Ello no lo hace menos interesante, pero sí le resta al texto un poco de generalidad y, a la postre, de utilidad. También le resta valor el hecho de que los datos, tanto en el libro como en los soportes en la Red, no se hallen todo lo actualizados que convendría. En un tema como el del cambio climático y en un contexto económico tan rápidamente cambiante, no es muy adecuado que se presenten datos de emisiones totales o per cápita, o de emisiones por unidades de producto interior bruto, por ejemplo, basadas en datos del año 2004 cuando el libro se ha publicado en 2010. Seis años en estos ámbitos es un abismo.

Por lo que se refiere a la edición en sí misma, sobre todo al soporte gráfico, muchas veces resulta confusa la interpretación de las figuras; originalmente muchas de ellas fueron diseñadas en color, por lo que al ser reproducidas en blanco y negro plantean dudas de comprensión al lector.

Dejando de lado los aspectos formales, el contenido del texto resulta útil e interesante. En la primera parte se presenta

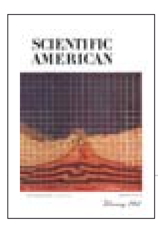

NASA

un resumen bien documentado, breve y preciso sobre la ciencia del cambio climático, respondiendo a preguntas del tipo «¿qué puede pasarnos?» o «¿cómo sabemos que los humanos somos responsables del calentamiento de la atmósfera?». La segunda parte se dedica a analizar las soluciones. Se plantean cuestiones y análisis que habitualmente no llegan a la opinión pública: ¿De quién es la atmósfera? ¿Qué puede hacer una familia para disminuir sus emisiones? Se afirma y se desarrolla que no hay una única solución para el problema del cambio climático, sino que precisamente la solución radica en un cúmulo de acciones que inciden, sobre todo, en el ámbito energético. La tercera parte del libro entra de lleno en los aspectos sociales. Comienza discutiendo el mercado de carbono y los puntos de encuentro de ciudadanos a distintas escalas que pueden ayudar a la gestión del problema.

Para terminar, el texto dedica un espacio notable a proponer treinta y cinco acciones que repercuten sobre el clima y que pueden llevarse a cabo inmediatamente. De estas acciones, veinte corresponden a estrategias de mitigación de las emisiones y de adaptación a las consecuencias del cambio de las condiciones ambientales. Las otras quince se dedican a promover la investigación y la educación multidisciplinar, que son fundamentales para poder proseguir con el debate público riguroso y necesario sobre el uso de los recursos, el uso de la energía y sus consecuencias ambientales, económicas y sociales.

—Josep Enric Llebot

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Febrero 1961

La estructura de las proteínas

«Solo después de descubrir las estructuras de un gran número de proteínas estarán los bioquímicos preparados para contestar a muchas de las preguntas fundamentales que llevan tiempo formulándose. Conviene señalar que el enfoque químico no brinda una solución completa al problema de la estructura proteica. El orden de los enlaces en la cadena no lo es todo. Cada cadena se enrolla y se pliega según un patrón tridimensional, tan importante para la determinación de la actividad biológica como la secuencia de átomos. Los métodos químicos solo pueden proporcionar una visión parcial interna de esa estructura tridimensional, o "terciaria". En años recientes el problema espacial ha empezado a ceder gracias al análisis por rayos X.

—William H. Stein y Stanford Moore»

Stein y Moore compartieron el premio Nobel de química de 1972 por su trabajo sobre el complejo proteico de la ribonucleasa.

A prueba de fallos

«Según informó la agencia estadounidense *Associated Press*, "el 5 de octubre, las reflexiones del radar en la Luna provocaron un sobresalto en los centros de defensa aérea del país por la supuesta presencia de misiles. El incidente se produjo cuando los ordenadores del Sistema de detección temprana de misiles balísticos, en Thule (Groenlandia), captaron señales de radar del mismo centro rebotadas en la Luna, a 400.000 kilómetros de distancia". Según prosigue el parte de la Fuerza Aérea, "el susto fue sólo momentáneo, ya que una verificación rápida reveló el error... Afirmó la Fuerza Aérea que sus instalaciones habían sido ajustadas para evitar sobresaltos de esa naturaleza."»



Inventores y agricultores: la mecanización aumenta la producción agrícola, 1911.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIV, N.º 7; 18 DE FEBRERO DE 1911



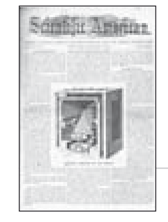
Febrero 1911

Inventores y agricultores

«En todas las historias sobre la construcción de un imperio, ningún capítulo es comparable al de la transformación del vasto Oeste. Una enorme extensión de praderas, desiertos y bosques primigenios se convirtió en el imperio agrícola más rico y extenso del mundo. La rapidez y el alcance de la transformación se debió en gran medida a la invención de una maquinaria agrícola de una precisión y capacidad extraordinarias (*véase la ilustración*). Los ingenieros mecánicos han simplificado y a la vez aumentado el rendimiento del trabajo agrícola.»

Ratas y personas

«En 1905 se encargó a la Comisión de Investigación de Epidemias que analizara la peste en la India, y esta no tardó en fijar su atención en la relación entre la plaga en las ratas y la peste humana. Debidamente estudiado cada brote de peste bubónica, se halló que aquel estaba asociado a la enfermedad entre las ratas, la epizootia que precede a la epidemia entre diez y catorce días. En Bombay la población de ratas es enorme. Casi podría afirmarse que es un animal domesticado: *Mus decumanus* (rata parda o gris) prolifera dentro de la ciudad en cloacas, barrancos y letrinas exteriores, y *Mus rattus* (rata negra) vive en cantidades innúmeras en las viviendas de las personas.»



Febrero 1861

Insecticidas piretroides

«En tiempo reciente se ha introducido en el mercado de fármacos un polvo vegetal con el nombre de "pelitre del Cáucaso y de Persia" destinado al exterminio de insectos, parásitos vegetales, etcétera. Excepto su fabricante, hasta hace poco nadie más conocía el origen botánico de ese polvo. Durante algunos años se creyó erróneamente que procedía de Persia. Pero el doctor Koch ha establecido de forma clara que su origen se halla en las provincias caucásicas, en las aún poco conocidas flores de *Pyrethrum roseum* y de *Pyrethrum carneum*. De color gris amarillento, el polvo es totalmente inodoro, aunque algo irritante al olfato; al principio es casi insípido, pero al cabo deja una sensación ardiente en la lengua. Tras haberse demostrado su eficacia en la destrucción de chinches, cucarachas, parásitos de plantas delicadas, así como su inocuidad en humanos, la generalización de su uso resultaría de gran importancia para las familias y los horticultores.»

Cerradura demasiado segura

«Hace poco se perdió la clave de la cerradura de seguridad del arca del Banco Revere (Boston). Con su millón de combinaciones, la pericia mecánica del fabricante no bastó para abrirla. El negocio se paralizó. Al final, una cuadrilla de obreros se puso manos a la obra para derribar el muro de mampostería.»

EVOLUCIÓN

Origen de la copulación

John A. Long

El hallazgo de ciertos peces fósiles hace retroceder el origen de la cópula en los vertebrados.

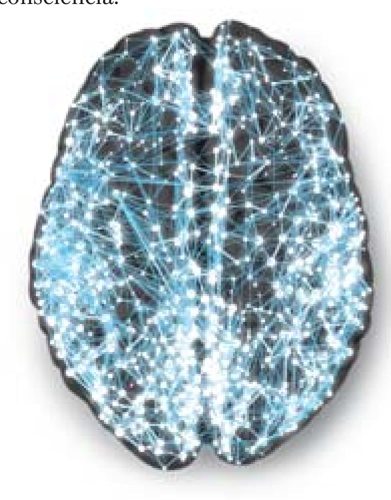


NEUROCIENCIA

Cien billones de conexiones

Carl Zimmer

El ruido de miles de millones de neuronas tratando de comunicarse entre sí puede esconder una pista crucial para comprender la consciencia.



COMPUTACIÓN



Robots científicos

Ross D. King

Se están desarrollando máquinas con capacidad de concebir hipótesis, realizar experimentos que las comprueben y evaluar los resultados.

MEDIOAMBIENTE

Víctimas del cambio climático

Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart

La alteración de los regímenes pluviales y las líneas de costa van a provocar migraciones en masa a una escala sin precedentes.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Ideas que cambian el mundo* y *El problema de la detención óptima*; Alejandro Bonmatí: *Fósiles con restos de vida*; Joandomènec Ros: *Vida invisible*; Tanja Sachse: *El conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones*; Sara Arganda: *Biomecánica del serpenteo*; J. Vilardell: *Aerolíneas espaciales, Hace...* y *Curiosidades de la física*; Mercè Piqueras: *Jane de la jungla*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España